

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE ÓPTICA**



**TESIS DOCTORAL**

**Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de  
radiación solar**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**Antonio Álvarez Fernández-Balbuena**

**Directores**

**Daniel Vázquez Moliní  
Eusebio Bernabeu Martínez  
Ángel García Botella**

**Madrid, 2011**



---

# Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar

---

ANTONIO ÁLVAREZ FERNÁNDEZ-BALBUENA

Memoria de tesis doctoral presentada para optar al título de  
Doctor en Óptica, Optometría y Visión por la  
Universidad Complutense de Madrid

*Directores:*

Dr. Daniel VÁZQUEZ MOLINÍ  
Dr. Eusebio BERNABEU MARTÍNEZ  
Dr. Ángel GARCÍA BOTELLA

Madrid 2011



A Manolo y Lú



# Agradecimientos

El trabajo que presento en este documento no hubiese sido posible sin la colaboración desinteresada de mucha gente. En estas líneas intentaré expresar mi gratitud a gente a la que tal vez ya se lo he dicho personalmente, si bien me gustaría dejarlo por escrito. Menciono como imprescindible y enriquecedor el apoyo empresarial durante esta tesis doctoral ya que complementa los recursos que tiene la Universidad a nivel humano y material.

Me gustaría agradecer la formación recibida durante mi vida académica en la diplomatura de óptica. Esta formación continuó en el Laboratorio de Ensayos Ópticos de Tecnología Avanzada "Cueva" de la Fac. de C.C. Físicas. Allí recibí el apoyo y enseñanzas de miembros del Dpto. de Óptica que ahora son en su mayoría profesores como Zoido, Quiroga, José Antonio Gómez, José Alonso, Agustín, Héctor, Alda, Chemita, Óscar y Cuqui... Entre ellos estaba el Director del Dpto. de Óptica, Eusebio Bernabeu que junto con Daniel Vázquez y Ángel García son mis actuales Directores de tesis, me acogieron con ganas, a pesar de mi formación inicial de diplomado, y a los que agradezco el conducirme sin dudas ni dilación a la consecución de esta tesis doctoral. En la E.U.O., con Chueca a la cabeza, se montó una "neo-cueva" en la que trabajan becarios como Javier Muñoz y Mario González de los que no sería justo olvidarme ya que han contribuido a este y otros muchos trabajos de investigación muchas veces por el interés de aprender.

No me olvido de mis compañeros de trabajo "laborales" que siempre están dispuestos a ayudar sin pedir ni esperar nada por ello, especialmente a Berta García por su profesionalidad e interés.

Mar, mi mujer, ha tenido paciencia y más paciencia cuando se ha visto obligada a cuidar a Jaime mientras yo estaba escribiendo cosas. Gracias a mis padres, lamento profundamente que no estén conmigo, su formación como Arquitectos y su educación liberal han sido muy importantes en mi dedicación en *Corpus et Animam* a la investigación.



# Índice general

Agradecimientos . . . . .	1
Índice de figuras . . . . .	7
Índice de tablas . . . . .	11
<b>1. Introducción</b>	<b>13</b>
1.1. Antecedentes y motivación . . . . .	13
1.2. Objetivos de esta Memoria . . . . .	16
1.2.1. Objetivo general . . . . .	16
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	17
1.3. Radiación solar . . . . .	18
1.4. Óptica geométrica, propagación de la luz . . . . .	21
1.5. Óptica anidólica (óptica no formadora de imagen) . . . . .	24
<b>2. Concentradores de radiación por campo de luz</b>	<b>27</b>
2.1. Conceptos . . . . .	28
2.1.1. Campo de luz. Pharosage vector y vector geométrico de flujo . . . . .	28
2.1.2. Líneas de campo (líneas de flujo) . . . . .	30
2.1.3. Propiedades del vector geométrico de flujo $\vec{J}$ . . . . .	32
2.1.4. Ratio de concentración . . . . .	32
2.1.5. Invariante étendue. Concentración máxima teórica . . . . .	33
2.2. Concentradores Elípticos . . . . .	35
2.2.1. Ratio elíptico de concentración . . . . .	35
2.2.2. Concentradores en coordenadas elípticas cilíndricas . . . . .	36
2.2.3. Concentradores elípticos, homofocales y no homofocales . . . . .	37
2.2.4. Simulación: concentrador parabólico compuesto elíptico (ECPC) . . . . .	40
2.2.5. Aplicaciones de los concentradores elípticos . . . . .	43
2.3. Concentrador asimétrico ideal en 3D . . . . .	44
2.3.1. Concentrador asimétrico ideal en 3D . . . . .	44
2.3.2. Propagación de rayos, hiperboloide de una hoja . . . . .	46
2.3.3. Simulación 3D hiperboloide de una hoja . . . . .	47
2.4. Concentrador hiperparabólico (HPC) . . . . .	49
2.4.1. Diseño mediante campo de luz . . . . .	49
2.4.2. Caracterización analítica del HPC . . . . .	52



## ÍNDICE GENERAL

---

2.4.3. Simulación eficiencia angular HPC . . . . .	53
<b>3. Captadores para iluminación, iluminadores</b>	<b>57</b>
3.1. Axicon óptico para optimización de arrays con integración espacial . . . . .	57
3.1.1. Arrays ópticos anidados con integración espacial . . . . .	58
3.1.2. Diseño unidad captadora axicon . . . . .	59
3.1.3. Prototipo experimental y simulaciones del cilindro-dioptrio-axicon . . . . .	60
3.1.4. Resultados . . . . .	64
3.2. Captador para luz natural aplicado a señalización vial vertical . . . . .	65
3.2.1. Unidad óptica anidológica de captación . . . . .	66
3.3. CPC prismático como lucernario . . . . .	71
3.3.1. Superficie prismática . . . . .	72
3.3.2. Simulación y prototipo experimental . . . . .	72
3.3.3. Resultados. Simulación CPC HPCPC salida luz . . . . .	74
3.3.4. Resultados. Experimental vs Simulación pupila de salida . . . . .	77
<b>4. Iluminación con luz natural con captador anidológico</b>	<b>79</b>
4.1. Esquema de diseño . . . . .	80
4.2. Parámetros fotométricos de diseño . . . . .	81
4.2.1. Iluminancia . . . . .	82
4.2.2. Luminancia . . . . .	82
4.2.3. Distribución espacial, uniformidad . . . . .	83
4.2.4. Deslumbramiento . . . . .	83
4.2.5. Color . . . . .	85
4.3. Diseño sistema anidológico de captación . . . . .	86
4.3.1. Disposición matricial y compactación . . . . .	88
4.3.2. Evaluación del rendimiento de la matriz TCPC . . . . .	89
4.3.3. Optimización matriz TCPC . . . . .	92
4.4. Transporte y distribución . . . . .	94
4.5. Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo . . . . .	95
4.5.1. Eficiencia del sistema . . . . .	95
4.5.2. Planos de iluminancia . . . . .	97
4.5.2.1. Optimización planos . . . . .	98
4.5.2.2. Resultados simulación básica . . . . .	100
4.5.3. Uniformidad en zonas de alta iluminancia (Hot Spots) . . . . .	102
4.5.4. Resultado optimizado. Planos iluminancia y curvas polares . . . . .	108
4.6. Prototipo escalado . . . . .	114
4.6.1. Medidas prototipo escalado y simulación . . . . .	114
4.7. Trazabilidad simulaciones con sistema real . . . . .	117
<b>5. Conclusiones</b>	<b>119</b>

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión</b>	<b>123</b>
A.1. Programas de trazado de rayos . . . . .	123
A.2. Tiempo VS precisión . . . . .	124
A.2.1. Trazado de rayos en un CPC . . . . .	124
A.3. Software simulación dirigido en Matlab . . . . .	127
<b>B. Optimización inteligente de sistemas ópticos</b>	<b>139</b>
B.1. Parámetros de optimización . . . . .	139
B.2. Control de aplicaciones . . . . .	140
B.3. Evaluación discreta del flujo vs. curvatura de una lente . . . .	140
B.4. Optimización Nelder-Mead curvatura lente 1 variable . . . .	143
B.5. Optimización Nelder-Mead curvatura lente 2 variables . . . .	146
<b>Publicaciones generadas: Artículos</b>	<b>151</b>
<b>Publicaciones generadas: Congresos</b>	<b>153</b>
<b>Publicaciones generadas: Patentes de invención</b>	<b>155</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>157</b>



# Índice de figuras

1.1. Espectro solar, AM0 extraterrestre (azul) y AM 1.5 terrestre global (rojo) . . . . .	19
1.2. Tormenta solar (fuente NASA) . . . . .	19
1.3. Radiación solar en Europa . . . . .	20
1.4. Propagación de un rayo en distintos materiales . . . . .	22
1.5. Derivación de la ley de refracción . . . . .	23
1.6. Sistema imagen y sistema anidólico . . . . .	24
2.1. Vector D producido por una fuente S en $P$ . . . . .	29
2.2. Líneas de flujo para emisor Lambertiano . . . . .	31
2.3. Objeto en infinito con extensión angular $2\theta$ . . . . .	33
2.4. Área de entrada y salida para concentrador ideal . . . . .	33
2.5. Emisor esférico . . . . .	34
2.6. Sistema de coordenadas elípticas cilíndricas $(u, v, z)$ de longitud focal $c = 1$ . . . . .	36
2.7. Parámetros geométricos de un CPC elíptico no homofocal con entrada elíptica y salida circular . . . . .	39
2.8. Parámetros geométricos de CPC elíptico no homofocal con entrada circular y salida elíptica . . . . .	40
2.9. Diseño 3D ECPC con focal 60 . . . . .	41
2.10. Transmitancia para 4 ECPC focales 0, 30, 60 y 99 homofocales, eje transversal . . . . .	42
2.11. Transmitancia para 4 ECPC focales 0, 30, 60 y 99 homofocales, eje longitudinal . . . . .	42
2.12. Transmitancia para un ECPC no homofocal, eje transversal y longitudinal . . . . .	43
2.13. Parámetros integración de contorno . . . . .	45
2.14. Bisectriz en P para sección hiperbólica . . . . .	47
2.15. Vista frontal del cono incidente . . . . .	48
2.16. Parámetros hiperboloide de una hoja . . . . .	48
2.17. Transmitancia hiperboloide de una hoja ( $0^\circ$ es el semieje menor, $90^\circ$ el mayor) . . . . .	49
2.18. Líneas de flujo para cono truncado. HPC y CPC. . . . .	50
2.19. Geometría HPC . . . . .	51
2.20. Trazado de rayos HPC, luz colimada a $30^\circ$ . . . . .	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.21. HPC 3D, abajo $f = 18$ , arriba $f = 30$ , $\theta = 30$ y $a' = 12$ . . .	52
2.22. Eficiencia HPC $\theta = 10$ para distintas focales . . . . .	54
2.23. Eficiencia HPC $\theta = 30$ para distintas focales . . . . .	54
2.24. Eficiencia HPC $\theta = 50$ para distintas focales . . . . .	55
3.1. Array anidado en configuración plana, array madre (A), ampliación array madre (B) donde se observa array hijo (C) . .	59
3.2. Tipos de unidades estudiadas . . . . .	60
3.3. Prototipo unidad axicon . . . . .	61
3.4. Montaje experimental prototipo unidad axicon . . . . .	61
3.5. Plano iluminancia experimental y simulado incidencia solar $40^\circ$	62
3.6. Perfil iluminancia experimental y simulado incidencia solar $40^\circ$	62
3.7. Comparativa eficiencia experimental y simulada . . . . .	63
3.8. Esquema gráfico de aperturas y contribuciones de cada elemento	63
3.9. Contribución relativa experimental (rojo) y simulada (verde) para zona axicon y dioptrio . . . . .	64
3.10. Panel señalización vertical situado en A-6 . . . . .	65
3.11. Matriz de puntos conformando caracteres o símbolos . . . . .	66
3.12. Unidad óptica antideslumbramiento . . . . .	67
3.13. Trazado de rayos y mapa de iluminancia, unidad óptica altura solar $0^\circ$ . . . . .	68
3.14. Eficiencia unidad sobre la calzada . . . . .	68
3.15. Iluminancia para superficie de entrada de la unidad óptica, inclinada $70^\circ$ ( $E_{tilt70^\circ}$ ) . . . . .	70
3.16. Luminancia producida por la salida de la unidad vista desde la calzada . . . . .	70
3.17. Prototipo panel con guías cilíndricas . . . . .	71
3.18. Lámina prismática, a) refracción, b) TIR en azul reflexiones de Fresnel, en rojo radiación principal . . . . .	72
3.19. Zonas entrada luz en HPCPC $30^\circ$ . . . . .	73
3.20. Prototipo HPCPC $30^\circ$ . . . . .	73
3.21. Esquema montaje experimental prototipo HPCPC $30^\circ$ . . . .	74
3.22. Salida luz simulada CPC y HPCPC para diversos ángulos de incidencia . . . . .	75
3.23. Eficiencia HPCPC vs CPC, x CPC prismático, o CPC aluminio, * CPC prismático flujo en cono $30$ grados . . . . .	76
3.24. Irradiancia en pupila de salida, incidencia $0^\circ$ , a) simulado b) experimental . . . . .	77
3.25. Irradiancia en pupila de salida, incidencia $15^\circ$ , a) simulado b) experimental . . . . .	77
3.26. Irradiancia en pupila de salida, incidencia $60^\circ$ , a) simulado b) experimental . . . . .	78
4.1. Esquema sistema de iluminación con luz natural . . . . .	80
4.2. Esquema TCPC, línea roja corresponde al truncamiento . . .	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

4.3.	TCPC alzado y perspectiva . . . . .	87
4.4.	TCPC Compactación . . . . .	88
4.5.	Esquema inclinación matriz TCPC y radiación solar (lux) Madrid a 52º Sur cielo claro . . . . .	90
4.6.	Matriz TCPC y prototipo 3D (estereolitografía sobre resina plástica) . . . . .	91
4.7.	Eficiencia Matriz TCPC sin guía de luz . . . . .	91
4.8.	Eficiencia Matriz TCPC con guía de luz . . . . .	92
4.9.	Trazado rayos Matriz TCPC, elevación 60º incidencia Sur-Este	93
4.10.	Matriz TCPC inicial (izquierda) y diseño VarG12 (derecha) .	94
4.11.	Esquema sistema de iluminación . . . . .	96
4.12.	Eficiencia luminarias y total para 7 posiciones solares . . . . .	98
4.13.	Procesado de planos de iluminancia . . . . .	99
4.14.	Incremento de precisión de 4 a 25 millones de rayos . . . . .	100
4.15.	Planos de iluminancia simulación básica . . . . .	101
4.16.	Planos de iluminancia simulación básica . . . . .	101
4.17.	Planos de iluminancia, posicion 60º 60º . . . . .	102
4.18.	Planos de iluminancia, posicion 30º 30º . . . . .	103
4.19.	Softgloss esquema funcionamiento . . . . .	103
4.20.	Softgloss 720, perfilometría con microscopía confocal . . . . .	104
4.21.	Trazado de rayos incidencia longitudinal en material Softgloss a 45º . . . . .	104
4.22.	Comparativa planos de iluminancia con difusor en la entrada, posicion 0º 60º . . . . .	105
4.23.	Perfil difusores horizontal y transversal . . . . .	105
4.24.	Eficiencia con difusores . . . . .	106
4.25.	Eficiencia con sistemas estudiados . . . . .	106
4.26.	Planos de iluminancia configuración final . . . . .	108
4.27.	Prototipo del colector . . . . .	114
4.28.	Medida experimental prototipo . . . . .	115
4.29.	Histograma $\Delta\eta$ . . . . .	116
4.30.	Planos de iluminancia, prototipo experimental . . . . .	116
4.31.	Planos de iluminancia, prototipo simulado . . . . .	117
A.1.	Concentrador parabólico compuesto 30º 3D . . . . .	124
A.2.	Curva eficiencia CPC VS numero facetas . . . . .	125
A.3.	Tiempo empleado de trazado de rayos . . . . .	126
A.4.	Diagrama de flujos simulación CPC afacetado, verde Matlab, azul TracePro . . . . .	128
A.5.	CPC afacetado 8 lados diseñado por CPCfacetasprograma . .	130
B.1.	Diagrama de flujo de la optimización, verde Matlab, azul Tra- cePro, rojo Excel y rosa SolidWorks . . . . .	141
B.2.	Cotas lente . . . . .	141
B.3.	Eficiencia VS radio lente . . . . .	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

B.4. Mapa irradiancia detector 1x1, radio lente 65 mm . . . . .	142
B.5. Mapa irradiancia detector 1x1, radio lente 68 mm . . . . .	143
B.6. Minimización función de mérito para detector 1x1 . . . . .	145
B.7. Distribución de radios en minimización detector 1x1 . . . . .	147
B.8. Irradiancia detector 1x1 para mejor eficiencia . . . . .	148
B.9. Irradiancia detector 2x2 para mejor eficiencia . . . . .	148

# Índice de tablas

2.1. Relación entre $\theta_a$ y $\theta_b$ para los distintos tipos de concentradores	39
2.2. ECPC calculados . . . . .	41
3.1. Eficiencia en la transferencia de energía desde el plano de entrada de un integrador espacial hasta la imagen sintética del mismo. Resultados obtenidos por simulación de trazado de rayos con luz colimada . . . . .	65
4.1. Parámetros optimización matriz TCPC . . . . .	93
4.2. Matrices TCPCs optimizadas, AA: dato no revelado . . . . .	94
4.3. Posiciones simuladas . . . . .	97
4.4. Uniformidad en $10 \times 5 m^2$ para distintas configuraciones . . . . .	107
4.5. Curvas polares de emisión (Eulumdat) para luminarias 1 a 4 a distintas posiciones solares . . . . .	110
4.6. Simulación iluminancia con Dialux . . . . .	113
4.7. Dimensiones prototipo . . . . .	114
4.8. Eficiencia prototipo (%), medidas experimentalmente y simuladas . . . . .	115
4.9. Trazabilidad prototipo simulación-real . . . . .	117
A.1. Parámetro calidad . . . . .	126
B.1. Relación eficiencias para cálculo manual y con algoritmo Simplex . . . . .	145
B.2. Relación eficiencias con algoritmo Simplex 1 y 2 variables . . . . .	148





# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes y motivación

Los primeros vestigios escritos del uso de la radiación solar por el hombre provienen de la antigua Grecia. Durante el siglo V a.e.c. en Grecia el carbón y la madera escaseaban, dependiendo de importaciones de otros países. Durante el periodo Helenístico se empieza a utilizar la radiación del Sol [1] para calentar y enfriar edificaciones, Esquilo, Aristóteles y Jenofonte enumeraron principios de uso de la radiación solar en invierno para minimizar la ganancia de calor en verano. En Roma también se consumen las reservas de combustible con deforestaciones masivas en torno a ciudades importantes. En el siglo I se emplea la calefacción por ciertos ciudadanos. Un ensayo hecho en una reconstrucción de una villa romana muestra que se consumen 130 kg de madera cada dos días para una villa de  $160\text{ m}^3$ . Arquitectos Romanos como Palladio proponen la orientación de edificaciones como una manera de aprovechar la radiación solar. Los Romanos aplicaron el vidrio para uso en ventanas, los paneles más grandes descubiertos miden  $0.33 \times 0.55\text{ m}$ . Un pasaje escrito por Palladio muestra que el vidrio transparente es opaco a la radiación de longitud de onda larga, dando una primera aproximación a lo que se conoce actualmente como efecto invernadero. El uso de sistemas ópticos como los espejos también ha sido usado por los antiguos Griegos, conocían que apuntando un gran número de espejos planos al mismo punto podían llegar a prender fuego. Theophrastus escribe en el siglo IV a.e.c. sobre espejos hechos de plata pulida o cobre. Diocles, un matemático Griego del siglo II a.e.c., da la primera prueba geométrica de espejos parabólicos y esféricos cóncavos [2]. En el contexto de una tesis sería imposible describir históricamente las aportaciones que ha habido a lo largo de la historia de manera exhaustiva pero si nos acercamos a una época más reciente sería justo nombrar a Kepler y como determinó órbitas verdaderas a partir de órbitas aparentes en base a las observaciones de Tycho Brahe. En 1860 August Monchot, profesor de Matemáticas, basándose en el trabajo de Saussure diseña un receptor solar creando una caldera que eleva la temperatura del

## 1. Introducción

---

agua de 10° a 100°C en menos de una hora. Esta caldera conectada a un motor a vapor da origen al primer motor solar. El éxito de estos experimentos lleva al gobierno francés a financiar su trabajo. En 1878 Mouchot diseña y construye, para la Exposición Universal de París, un motor solar con un espejo de 5.04 m de diámetro en el eje mayor y 1 m en el menor que podía generar una presión de 6 atm. en 30 minutos. La generación de agua caliente o vapor con el que conseguir movimiento es importante pero un paso más es el uso de la radiación solar para la generación de electricidad. En 1839 Alexandre-Edmond Becquerel [3] observa el efecto fotovoltaico, posteriormente en 1883 Charles Fritts [4] fabrica la primera célula fotovoltaica con una eficiencia del 1 %, estos descubrimientos proporcionan las bases teóricas y prácticas para la conversión de la radiación solar en electricidad. En 1954 en los Laboratorios Bell experimentando accidentalmente con semiconductores se encontró que el Silicio con algunas impurezas era muy sensitivo a la luz, esto proporciona una mejora importante en la eficiencia de la conversión. En la actualidad el uso de células solares de mejor eficiencia es todo un avance ya que a iguales sistemas de concentración permiten convertir una zona del espectro más amplia debido, por ejemplo, a las células solares multiunión compuestas por varios materiales. En todas estas tecnologías el diseño de los sistemas ópticos de captación y concentración para primarios y secundarios por distintos métodos de cálculo [5, 6, 7, 8, 9], normalmente basados en la óptica geométrica, como el rayo límite, las líneas de campo, las superficies “freeform”, tiene una importancia primordial ya que el sistema óptico es el que consigue que la radiación llegue con el máximo flujo posible y en la distribución de irradiancia adecuada a cada uso.

El sector de la energía esta actualmente en un periodo de cambio y reflexión. Las fuentes de energía convencionales son contaminantes y limitadas, por ello se hace imprescindible el rápido desarrollo de sistemas limpios y sostenibles. Desde las instituciones, la CE, los gobiernos centrales, regionales y locales se esta legislando para incentivar en algunos casos este tipo de energías renovables. Este esfuerzo inversor, cuando está bien canalizado, lleva a las empresas a recurrir a la investigación en sistemas alternativos que hagan viable económicamente el uso de estas nuevas tecnologías.

La radiación solar proviene de una fuente de energía renovable e inagotable <sup>1</sup> como es el Sol. Dependiendo de su uso la energía solar se puede subdividir en tres categorías en la que las tecnologías de captación, concentración y guiado de luz son básicas:

- Energía solar pasiva o directa
- Energía solar térmica
- Energía solar fotovoltaica

La térmica de baja temperatura se emplea principalmente para agua caliente sanitaria y calefacción aunque nuevas tecnologías están permitiendo

---

<sup>1</sup>se estima que la fase actual de protoestrella durará 5000 millones de años

## 1.1 Antecedentes y motivación

---

también emplearla como refrigeración. La térmica de alta temperatura o termoeléctrica implica procesos de instalación más largos debido a las inversiones a realizar. La energía solar fotovoltaica esta en auge y en proceso de cambio ya que hay una clara tendencia a una adecuación de tecnología en cuanto a concentración de luz así como en empleo de células que acepten rangos espectrales más elevados que lo que es capaz de usar el silicio. Mover las superficies receptoras (seguimiento solar) es una forma de maximizar la radiación recibida a lo largo de un periodo temporal con el objetivo de reducir el coste por kW. El seguimiento solar permite el uso de sistemas ópticos de concentración consiguiendo con ello reducir el área de la célula fotovoltaica con el objetivo básico de incrementar el rendimiento sin incrementar los costes.

El código técnico de la edificación en su sección HE4 obliga a la instalación en nuevas edificaciones de energía solar térmica y en su sección HE5 obliga a la instalación de solar fotovoltaica para cierto tipo de edificaciones vinculadas al sector servicios como hospitales, hoteles, hipermercados, etc. En España esta en vigor el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (plan E4) [10]. Este plan fue precedido por el 2005-2007 en el que se consiguió un ahorro energético superior a lo planificado inicialmente con un incremento de la aportación de generación eléctrica renovable del 12.9 % hasta alcanzar el 20.1 % en 2006.

La energía solar pasiva [11] es fundamental en el diseño de edificios. Se basa en el estudio de métodos para mantener la temperatura idónea de las edificaciones, también propone métodos concretos para obtener una correcta iluminación natural. Originariamente la iluminación natural consistía en hacer aberturas tanto en fachadas como en techos pero en la actualidad el empleo de sistemas ópticos para la captación y guiado de luz es imprescindible en la iluminación natural. Las medidas de actuación contempladas en el plan E4 para alcanzar el ahorro estimado, tienen como objetivo mejorar la eficiencia y uso energético de los edificios y sus instalaciones fijas dirigido al parque de edificios nuevos y al existente. Relativo a la iluminación natural el plan propone entre otras: *“Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior existentes: las actuaciones energéticas incluidas dentro de esta medida serán aquellas que consigan una reducción del consumo de energía convencional en la iluminación interior de los edificios, mediante actuaciones en sus instalaciones. Estas actuaciones podrán ser, sustitución de luminarias, lámparas y equipo, instalación de sistemas de control de encendido y regulación de nivel de iluminación con aprovechamiento de luz natural y cambio de sistema de iluminación”*

El consumo energético final en la iluminación de viviendas corresponde al 9 %, pero en el caso de edificios de uso distinto al de vivienda como los de uso administrativo este porcentaje se eleva hasta un 28 % [10], esta cifra tan elevada implica necesariamente una reflexión ya que esta igualando prácticamente al consumo energético estimado de uso en calefacción que es del 29 %.

## 1. Introducción

---

Los problemas técnicos que ha habido a lo largo de la historia se han subsanado parcialmente debido a mejoras en la fabricación, mejoras en los diseños, etc. pero hay un problema común que sigue dificultando el aprovechamiento de este tipo de energía:

- Variación temporal y espacial de la radiación solar

Para un correcto aprovechamiento de esta radiación es necesario profundizar en los siguientes conceptos con el fin de mejorar la eficiencia:

- Captación de la radiación solar
- Concentración de la radiación solar
- Guiado de la energía
- Almacenamiento y transformación de la energía

Estos puntos son los que motivan la realización de esta tesis doctoral, entendiendo que la solución no es simple ni sencilla debido a la propia naturaleza del Sol. El almacenamiento y transformación de la energía esta fuera del alcance de esta tesis doctoral pero se ha incluido debido a la importancia que tiene.

La implantación de ciertas tecnologías sufre trabas que son dependientes de cada sociedad, en concreto hay barreras económicas, tecnológicas, normativas y sociales. Aunque actualmente el avance de las energías renovables resulta imparable, independientemente de la legislación, tanto por razones económicas (elevado precio de los hidrocarburos y su posible escasez) como por razones ecológicas (alteración de la atmósfera y en general del ecosistema planetario). Es necesaria e imperativa la investigación en mejoras a los sistemas actuales así como en nuevos desarrollos que propicien sistemas energéticos menos agresivos con el medio ambiente. En resumen, el actual esquema de consumo energético global no parece sostenible en el tiempo por lo que pequeños avances pueden ser aportaciones importantes en el largo plazo.

## 1.2. Objetivos de esta Memoria

### 1.2.1. Objetivo general

Como objetivo general de esta tesis se propone el estudio de sistemas ópticos no formadores de imagen -óptica anidólica- para la concentración, captación o guiado de radiación. Este objetivo se aborda desde perspectivas tanto teóricas como prácticas. Desde el punto de vista teórico se proponen métodos de diseño basados en la teoría de campo para el cálculo de sistemas concentradores y/o captadores de luz en tres dimensiones (3D). Como premisa de partida se propone el uso del análisis vectorial y de la teoría de campo

## 1.2 Objetivos de esta Memoria

---

en iluminación. Para poder alcanzar este objetivo se plantea, capítulo 2, un estudio teórico en el que se han diseñado nuevas familias de concentradores producidos por la teoría de campo. Dentro de ese mismo capítulo se obtienen concentradores ideales en tres dimensiones, esta característica teórica es una parte primordial de la investigación ya que relaciona unívocamente una concordancia entre el diseño y la teoría desarrollada.

Desde un punto de vista práctico las relaciones de concentración obtenidas junto con eficiencias elevadas permiten ser optimistas en cuanto al uso de concentradores diseñados por líneas de campo en sistemas reales de concentración o guiado de radiación solar. Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Se propone el estudio de sistemas concentradores trabajando por reflexión que no sean de revolución, es decir asimétricos, diseñados mediante el estudio de las líneas de campo generadas por emisores asimétricos Lambertianos. Dentro de estos concentradores se muestra un diseño que es ideal en tres dimensiones para las condiciones de diseño, destacando que toda la radiación que llega dentro de los parámetros de diseño sale del sistema con una eficiencia del 100 %, capítulo 2.

En segundo lugar como objetivo particular de esta memoria se propone mediante un estudio práctico una mejora de la eficiencia del CPC <sup>2</sup>. Se presenta un captador de luz solar empleando una geometría derivada de un CPC en uso inverso que permitirá, mediante un sistema estático, mantener una iluminancia adecuada con captación de luz natural para un entorno de oficinas. En este caso particular la adecuación de la luz natural al entorno de trabajo es necesaria, por ello se va a investigar el uso de sistemas ópticos complementarios para mejorar la uniformidad y minimizar el deslumbramiento como se muestra en el capítulo 4.

Debido al tiempo de proceso empleado por los programas de cálculo óptico, en concreto de los de cálculo no secuencial, se ha visto la necesidad de cierta coherencia y optimización de los cálculos a realizar. El trazado de rayos sirve para validar el rendimiento de los diseños obtenidos pero esta técnica se muestra lenta en ciertas condiciones. Por ejemplo, el uso de sistemas ópticos asimétricos hace necesario el uso de superficies (facetas) para la modelización en tres dimensiones, estas superficies de tamaño finito conforman el sistema óptico. Un número elevado de facetas mejora la precisión obtenida pero ralentiza exponencialmente el tiempo de cálculo. Un estudio previo que determine número de facetas del sólido 3D y el número de rayos a trazar resulta determinante ya que permite minimizar el tiempo de cálculo manteniendo la precisión de los resultados, apéndice A.

La optimización es una parte importante del diseño de sistemas ópticos, actualmente los programas de trazado de rayos para óptica anidólica traen

---

<sup>2</sup>Concentrador parabólico compuesto

## 1. Introducción

---

ciertas utilidades pero son bastante limitadas. En el caso de los programas de formación de imagen las optimizaciones están muy conseguidas ya que se basan en las aberraciones, permitiendo una optimización en base a la minimización de las mismas. En esta memoria se propone diseñar una herramienta de optimización inteligente para ópticas complejas dirigida por Matlab, apéndice B, que maneje de manera autónoma programas de diseño 3D y programas de trazado de rayos comerciales y que permita introducir figuras de mérito complejas pero flexibles que incluyan eficiencia, uniformidad, curva polar de emisión, etc. Mediante algoritmos de minimización y dando pesos específicos a los parámetros empleados habitualmente en los sistemas para iluminación se podrá conseguir optimizar ópticas anidólicas sin las limitaciones dadas por los programas comerciales.

### 1.3. Radiación solar

La radiación solar proviene del Sol que es una estrella que se encuentra en el centro del Sistema Solar alrededor de la cual gira nuestro planeta en una órbita elíptica. El semieje menor de la órbita es de  $1,4966 \cdot 10^8$  km siendo el semieje mayor de  $1,4968 \cdot 10^8$  km con una excentricidad  $e = 0.0167$  [1]. Parámetros importantes para el diseño de concentradores solares son:

- distancia media a la tierra:  $1,496 \cdot 10^8$  km
- diámetro del Sol:  $1,392 \cdot 10^6$  km, 109 veces la Tierra
- ángulo medio subtendido desde la tierra:  $0,53^\circ$
- temperatura media de la superficie: 5800 K

El flujo de energía solar recibido por segundo en una superficie de área unitaria con su normal dirigida al Sol a una distancia media de la Tierra-Sol situada fuera de la atmósfera es prácticamente constante a lo largo del año. Esta cantidad se llama constante solar con un valor de  $1353 [W/m^2]$  [12]. La radiación emitida por el Sol comprende un espectro muy amplio de energía que va desde la radiación ultra-violeta hasta el infrarojo, principalmente en el rango de 290 nm a 2300 nm [13]. La radiación solar al atravesar la atmósfera sufre los procesos de absorción y difusión (scattering) los cuales atenúan el espectro que llega a la superficie terrestre, en la figura 1.1 se observan ciertas bandas de absorción producidas por estos fenómenos en el espectro que llega a la superficie de la tierra. La difusión de Rayleigh, producida por partículas pequeñas sólidas o líquidas es inversamente proporcional a  $\lambda^4$ , es particularmente importante ya que produce una distorsión del disco solar produciendo un aumento del ángulo subtendido por la radiación lo que conlleva a pérdidas de flujo en los sistemas de concentración y captación.

La luz visible para el ojo humano abarca una pequeña región de la radiación electromagnética emitida por el Sol que va aproximadamente desde

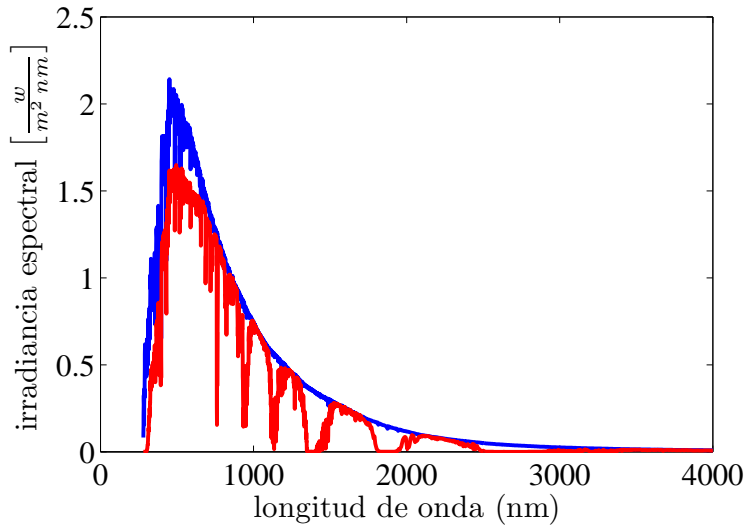


Figura 1.1: Espectro solar, AM0 extraterrestre (azul) y AM 1.5 terrestre global (rojo)

los 380 nm a los 780 nm. La luz natural consta de tres componentes que se deben diferenciar a la hora de hacer algún estudio sobre la misma. Radiación directa proveniente del Sol, radiación difusa proveniente de la bóveda celeste y luz procedente de reflexiones (suelo, objetos externos).

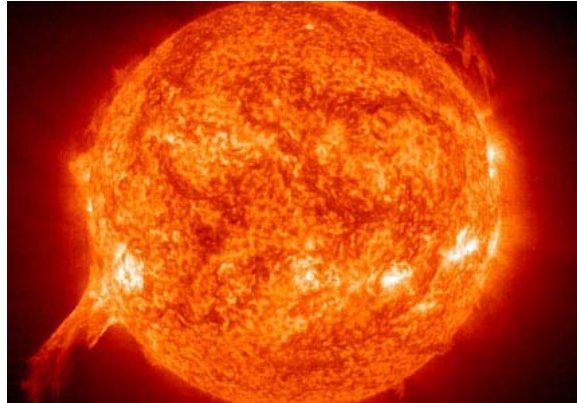


Figura 1.2: Tormenta solar (fuente NASA)

El espectro solar cambia según las condiciones atmosféricas, la orientación del Sol y la posición de observación. Por ello se han definido estándares para el espectro solar. La CIE<sup>3</sup> propone mediante informes técnicos distribuciones espectrales de irradiancia para el Sol. En el informe técnico CIE 85 de 1989 se dan datos del espectro solar fuera de la atmósfera y en la super-

<sup>3</sup>Commission Internationale de L'Éclairage



## 1. Introducción

ficie terrestre para distintas condiciones como luz directa, difusa y global. También la ASTM <sup>4</sup> propone diversos espectros solares que son empleados para evaluaciones de rendimiento de distintos sistemas como los fotovoltaicos. En la figura 1.1 el espectro AM0 corresponde a la radiación procedente del Sol fuera de la atmósfera. El AM 1.5 corresponde al espectro solar a nivel de suelo en condiciones atmosféricas concretas definidas por la ASTM para una superficie con una inclinación de 37° orientada hacia el sur. En el espectro AM 1.5 se observan unas bandas de absorción que son producidas por la atmósfera.

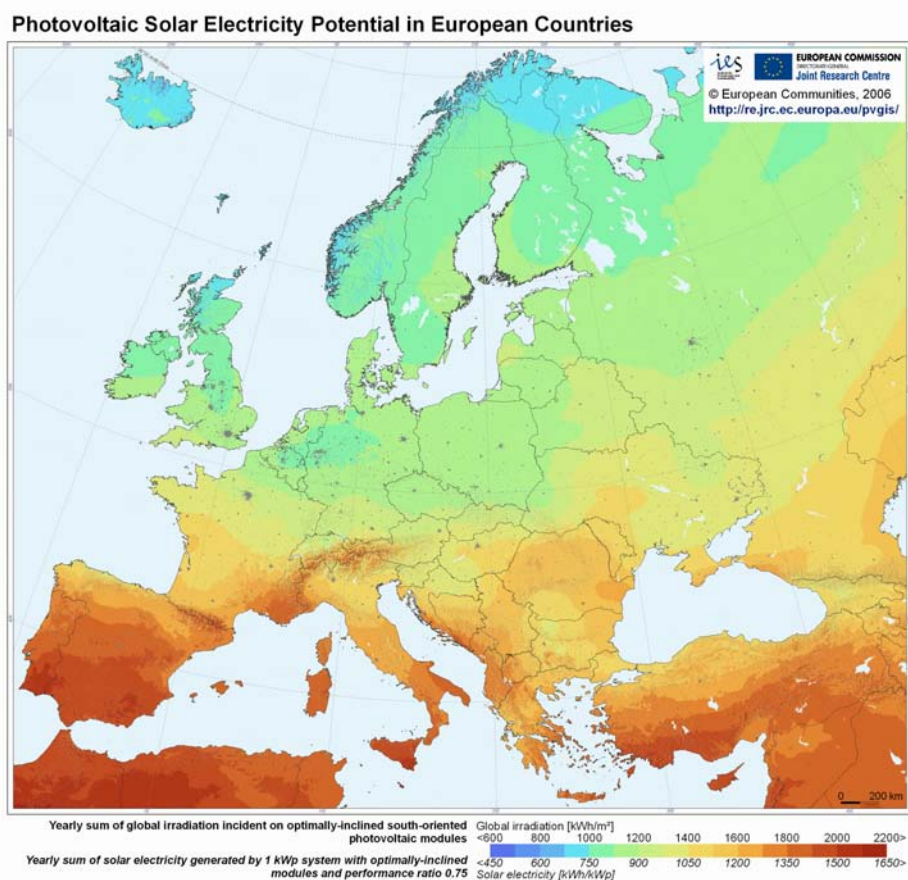


Figura 1.3: Radiación solar en Europa

La radiación solar que llega a la tierra se mide en  $kWh/m^2$ , hay diversos estudios que proporcionan estos valores con distintas aproximaciones en las distintas áreas geográficas. En la figura 1.3 se observa el potencial de la radiación solar medida en la zona de Europa [14] en un periodo que comprende desde 1981 a 1990. Otra fuente importante de datos estadísticos sobre la radiación solar en Europa se puede encontrar en Satel [15].

<sup>4</sup>American Society for Testing and Materials

### 1.4. Óptica geométrica, propagación de la luz

La energía electromagnética que emiten los cuerpos en ciertas condiciones se llama energía radiante. La propagación de la energía radiante responde a las leyes de la óptica geométrica. Otros fenómenos de interacción que no pueden ser descritos mediante la óptica geométrica son estudiados mediante la óptica ondulatoria que considera la radiación como una onda electromagnética y puede describir fenómenos como la interferencia y la difracción. La óptica geométrica tiene como objetivo fundamental determinar la trayectoria de la energía radiante a través de distintos medios materiales. Su desarrollo se sustenta en un único postulado físico denominado principio de Fermat y en los conceptos de rayo luminoso para caracterizar a la luz y el concepto de índice de refracción para caracterizar a los medios materiales.

#### Rayo de luz

Las trayectorias de la energía radiante en su propagación constituyen los rayos de luz. Si tenemos un punto emisor infinitamente pequeño situado a cierta distancia de una pantalla opaca con un orificio de tamaño finito, el punto emisor y el orificio determinan geoméricamente un cono. Este cono de luz recibe el nombre de haz de rayos. Cuando el diámetro del orificio tiende a 0 llegamos al concepto teórico ideal de rayo de luz. Este concepto de rayo no se puede obtener experimentalmente ya que si el diámetro del agujero se acerca a la longitud de onda de la radiación la divergencia del haz aumenta debido al fenómeno de la difracción.

#### Índice de refracción

La energía radiante se propaga en el vacío a una velocidad  $c$ , en los medios materiales esta radiación se propaga a una velocidad  $v$ . La velocidad en los medios materiales varía con la naturaleza de los mismos, podemos definir el índice de refracción como,

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

En un medio homogéneo e isótropo la velocidad de la energía radiante es igual en todos sus puntos y direcciones, por ello su índice de refracción será constante. Si el índice de refracción varía de un punto a otro y es independiente de la dirección tendremos un medio heterogéneo. Cuando la dirección implica un cambio de índice tendremos un medio anisótropo. Como ejemplo típico de medio isótropo y homogéneo tenemos los vidrios ópticos. El fenómeno de la dispersión cromática es debido a que el índice de refracción varía con la longitud de onda, por ello cuando se define un índice de refracción para un medio material es para una longitud de onda concreta.

## 1. Introducción

---

### Principio de Fermat

El principio de Fermat permite describir la propagación de la energía radiante a través de distintos medios. En un material estratificado compuesto de  $m$  capas con índices de refracción  $n_1$  a  $n_m$  el tiempo para ir de un punto A a otro B será:

$$t = \frac{s_1}{\nu_1} + \frac{s_2}{\nu_2} + \dots + \frac{s_m}{\nu_m}, \quad (1.2)$$

donde  $s_i$  y  $\nu_i$  son la longitud y la velocidad en las distintas capas. Si aplicamos el índice de refracción de cada capa el tiempo es,

$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m n_i s_i, \quad (1.3)$$

donde  $\sum n_i s_i$  es la longitud de camino óptico (LCO). En un medio no homogéneo donde el índice de refracción es función de la posición,  $n(s)$ , la longitud de camino óptico es,

$$LCO = \int_A^B n(s) ds, \quad (1.4)$$

sustituyendo el índice de refracción, ecuación 1.1, se obtiene,

$$LCO = \int_A^B n(s) ds = c \int_A^B \frac{ds}{dv} = c \int_{t_A}^{t_B} dt = ct, \quad (1.5)$$

así pues la longitud de camino óptico puede definirse como el producto de la velocidad de la luz en el vacío por el tiempo que tarda en recorrer la trayectoria.

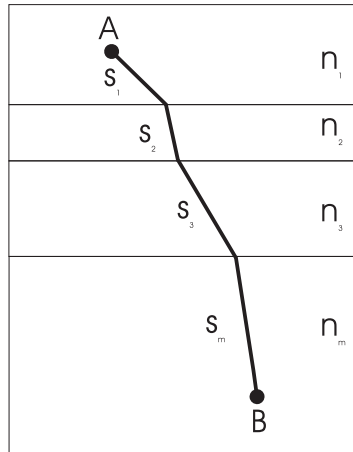


Figura 1.4: Propagación de un rayo en distintos materiales

El matemático francés Pierre de Fermat postuló en el siglo XVII: *Un rayo al ir de un punto A a uno B debe recorrer una longitud de camino óptico que es estacionaria o extremal con respecto a variaciones de ese camino.*

## 1.4 Óptica geométrica, propagación de la luz

Esta forma del principio de Fermat es la forma actual ya que el postulado original no era del todo riguroso al describir únicamente el principio de mínimo tiempo, hay casos particulares en los que la longitud de camino óptico no siempre ha de ser un mínimo. En el caso de una elipse cuya superficie exterior sea reflectora la LCO de un rayo que parte de un foco y sufre una reflexión pasando por el otro foco siempre es igual por propiedad geométrica de la curva, por ello la LCO es obviamente estacionaria con respecto a las variaciones en este caso.

### Ley de Snell

La ley de Snell se puede deducir a partir del principio de Fermat (al igual que la ley de la reflexión). Si tenemos dos medios separados por una superficie lisa, figura 1.5, de modo que tengamos una fuente luminosa en el punto P1 (0, y<sub>1</sub>), la luz atraviesa la frontera entre los dos medios en P (x, 0) y llega al punto P2 (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>). Como los dos medios son homogéneos la luz recorrerá líneas rectas en ellos de modo que en el primer medio el camino óptico es  $CO = n\sqrt{x^2 + y_1^2}$  y en el segundo medio  $CO = n'\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}$ . La longitud de camino óptico total de P1 a P2 es la suma de ambos términos.

$$LCO = n\sqrt{x^2 + y_1^2} + n'\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}, \quad (1.6)$$

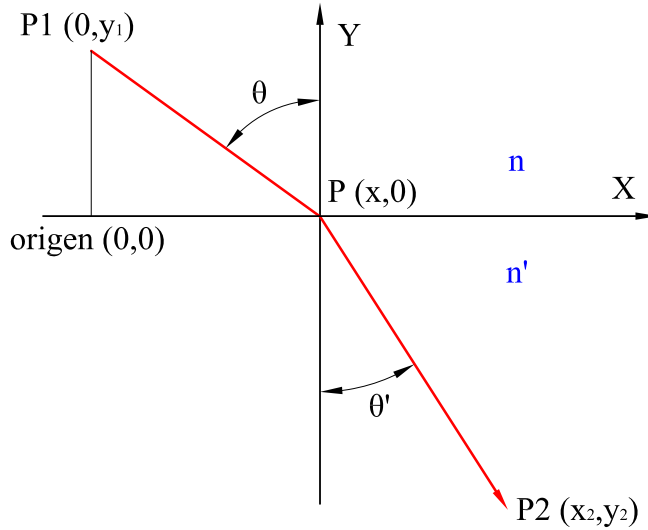


Figura 1.5: Derivación de la ley de refracción

Aplicando el principio de Fermat se impone la condición:

$$\frac{dLCO}{dx} = \frac{nx}{\sqrt{x^2 + y_1^2}} + \frac{n'(x_2 - x)}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} = 0, \quad (1.7)$$

donde se ha igualado a cero para encontrar el valor extremal. Pero justamente el cociente  $\frac{x}{\sqrt{x^2 + y_1^2}}$  es el seno del ángulo que forma el rayo de luz

## 1. Introducción

incidente con la normal a la superficie ( $\theta$ ) y el cociente  $\frac{(x_2-x)}{\sqrt{(x_2-x)^2+y_2^2}}$  el seno del ángulo entre la normal a la superficie y el rayo refractado ( $\theta'$ ), con lo cual se obtiene la ley de Snell:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta', \quad (1.8)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia y  $\theta'$  es el ángulo de la luz refractada. La ley de Snell se puede reescribir como:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = R, \quad (1.9)$$

donde  $R$  es la relación entre ambos índices de refracción. En el caso de que la interfase entre medios fuese especular entonces es de aplicación la ley de reflexión que dice: *el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión*.

### 1.5. Óptica anidólica (óptica no formadora de imagen)

Los sistemas formadores de imagen se basan en un objeto y la imagen que la óptica forma del objeto. El objeto es considerado un conjunto de puntos emitiendo en todas direcciones. La luz que es captada por el sistema óptico forma los puntos de la imagen. En la óptica anidólica en vez de un objeto se tiene una fuente de luz y en vez de una imagen se tiene un receptor donde se producirá una mapa de irradiancia proveniente de la fuente. La óptica anidólica se basa en el diseño de sistemas ópticos en los que no es necesaria la formación de imagen (proveniente del Griego, *an* + *eidolon*, significando sin imagen). Permite mayor flexibilidad en el diseño de sistemas ópticos que la óptica formadora de imagen ya que no requiere mantener la conjugación entre los puntos del espacio imagen y espacio objeto. En la figura 1.6 se observa como en el sistema anidólico no hay una correspondencia entre puntos, esto permite optimizar la transferencia de energía por tener mayor libertad de diseño.

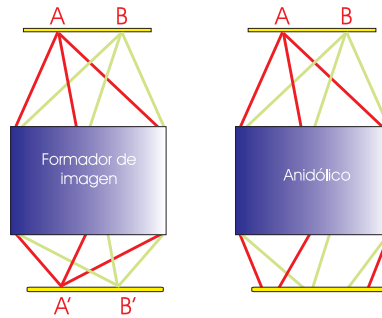


Figura 1.6: Sistema imagen y sistema anidólico

## 1.5 Óptica anidólica (óptica no formadora de imagen)

---

La óptica anidólica tiene como objetivo principal la transferencia de radiación de manera eficiente y controlada. La óptica anidólica se emplea para el diseño de concentradores e iluminadores donde la formación de imagen no es estrictamente necesaria aunque no es descartable y donde las aberraciones no son estrictamente aberraciones ya que no se prima la formación de imagen. Hay dos aspectos fundamentales en el diseño de concentradores para el área solar, uno es maximizar la transferencia de flujo y el otro es crear distribuciones controladas de la irradiancia. Este campo se desarrolla gracias a los trabajos de Hintenberger y de Winston [16, 17] donde se desarrolla el concentrador parabólico compuesto que es uno de los sistemas de concentración anidólicos de referencia, el cual lleva investigándose y aplicándose durante los últimos 30 años.

El software empleado para el cálculo de sistemas anidólicos es diferente al empleado en sistemas formadores de imagen. Es necesario el empleo de un trazado de rayos no secuencial donde no está predeterminado el orden de las superficies para el impacto de los rayos; es decir el rayo puede ir y volver y será tenido en cuenta junto con las pérdidas de energía debidas a interacción con las distintas interfaces y materiales. El software empleado para iluminación utiliza una técnica estadística para calcular el comportamiento de procesos aleatorios. Esta técnica llamada “Monte Carlo Ray Tracing” permite simular, por ejemplo, la difracción o la difusión de la luz reduciendo el tiempo de cálculo. Si se emplease un trazado de rayos exacto en ciertas condiciones como la difusión el incremento exponencial de rayos en cada interfase haría inviable el cálculo en sistemas complejos debido al incremento de tiempo de procesado. En el Apéndice A se realiza una evaluación de software de trazado de rayos para sistemas ópticos así como su precisión y tiempo de procesado.



## Capítulo 2

# Concentradores de radiación por campo de luz

En este capítulo se presenta el desarrollo de nuevos sistemas ópticos, cuyo diseño se realiza empleando la teoría del campo de luz, dirigidos a mejorar la funcionalidad de los dispositivos para concentrar radiación solar, tanto en su eficiencia como en las diversas cualidades y parámetros. Estos concentradores pueden emplearse de forma aislada o junto a distintos sistemas ópticos en los que la captación y transferencia de energía es su principal objetivo. Como observación, en esta memoria de tesis doctoral se hablará, en ocasiones, de fotometría y en otras de radiometría entendiendo la fotometría como una rama de la radiometría aplicable a la visión en el ojo humano pesando las unidades radiométricas por la curva de visibilidad,  $V(\lambda)$ , del ojo humano.

En los primeros tratados de fotometría, escritos por J. H. Lambert y P. Bouguer [18, 19], la fotometría era una disciplina separada, basada en el estándar de la candela y con poca relación con el resto de la física. La fotometría trata con magnitudes escalares, estas magnitudes escalares han servido para dar valores concretos a distintas situaciones ya sean proyectos de iluminación, de concentración solar, etc. El uso de magnitudes vectoriales en la fotometría proporciona mayor amplitud de conocimiento al tener la direccionalidad además del módulo -magnitud escalar utilizada normalmente-. El empleo de la teoría de campo aplicada a la fotometría ha sido estudiada por distintos autores. En particular destaca tanto por la profundidad de su desarrollo, como sobre todo por la difusión y repercusión tanto industrial como científica el trabajo desarrollado por el método de las líneas de flujo empleado por R. Winston y W. T. Welford [6, 20]. También A. Gershun [21] introduce el concepto de vector de luz para establecer una teoría de campo de luz. Asimismo P. Moon y D. Spencer introdujeron el concepto de “pharosage vector” con el que desarrollaría la teoría del campo fotónico en su libro “The Photoc Field” [22], siendo análogas las definiciones dadas por estos tres autores.



## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

### 2.1. Conceptos

#### 2.1.1. Campo de luz. Pharosage vector y vector geométrico de flujo

Un campo de radiación es una región en la que la energía radiante se propaga a una velocidad característica del medio. Es posible analizar de manera bastante amplia la radiometría como un campo [23, 24], que se puede llamar campo de luz, tratando las unidades básicas de la radiometría como unidades del campo. En este trabajo el tratamiento del campo va a implicar que estamos en un medio sin absorción, sin difusión e isotrópico en todas las direcciones. El tratamiento vectorial de la radiometría es directamente aplicable a la fotometría mediante los correspondientes factores de conversión entre las distintas unidades.

Típicamente el flujo por unidad de área es una magnitud escalar,  $D$ , y por ello se puede medir en un punto  $P$  del espacio. Estas magnitudes varían en el espacio con leyes conocidas y por ello pueden ser estudiadas en su forma vectorial con la consiguiente mejora en el tratamiento matemático de la fotometría para ciertos problemas.

El concepto de vector pharosage  $\vec{D}$ , estudiado por Moon [22], trata la magnitud  $D$  en su forma vectorial, otras publicaciones de Winston y Welford [6] lo llaman vector geométrico de flujo  $\vec{J}$ .

Una de las relaciones más básicas en la fotometría es la relación del coseno, estudiada por Lambert en su ley del coseno. Esta relación explica el funcionamiento de una emisor o radiador Lambertiano en donde la irradiancia (o exitancia) varía con el coseno del ángulo entre la dirección de emisión (o salida) y el ángulo con la normal. Esta relación implica que la radiancia aparente de la fuente es independiente del ángulo de visión. Esto es debido a que la disminución del área proyectada sigue esta misma ley con lo que finalmente la radiancia o luminancia se mantienen invariables.

La aplicación del coseno a un rayo de luz incidente en una superficie con un ángulo  $\theta$  produce una relación entre el pharosage incidente y el vector a incidencia normal tal que  $D_n = D \cos \theta$ , donde  $D_n$  es el valor a incidencia normal. Sin embargo en la figura 2.1 se observa que lo anterior es la relación del producto escalar entre un vector y el componente normal de la superficie.

$$D_n = \vec{D} \cdot \vec{N}, \quad (2.1)$$

donde  $\vec{N}$  es el vector unitario normal a la superficie,

Para fuentes pequeñas la dirección del vector  $\vec{D}$  es desde la fuente hacia el punto  $P$ , en el caso de fuentes simétricas la dirección es desde el centro hacia el punto elegido. El tratamiento algebraico permite la suma de dos vectores  $\vec{D}$  de tal forma que con dos fuentes  $F_1$  y  $F_2$  el vector  $\vec{D}_{total} = \vec{D}_{f1} + \vec{D}_{f2}$ . Igualmente los vectores se pueden escribir en término de sus componentes,

$$\vec{D} = D_x \vec{i} + D_y \vec{j} + D_z \vec{k}, \quad (2.2)$$

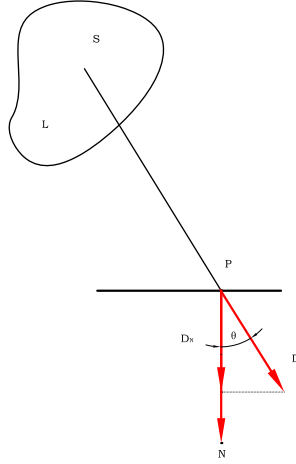


Figura 2.1: Vector  $D$  producido por una fuente  $S$  en  $P$

donde  $D_i$  es un componente de  $\vec{D}$  e  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  y  $\vec{k}$  son los vectores unitarios en las direcciones del eje de coordenadas correspondiente.

Otra magnitud importante al que P. Moon llama flujo radiante “Pharos”  $F$  [W], se define como una integral de superficie,

$$F = \int_s \vec{D} d\vec{A}, \quad (2.3)$$

donde  $d\vec{A}$  es un vector perpendicular a la superficie  $A$  cuyo módulo es el área de  $A$ . Este teorema es una definición muy interesante del vector geométrico de flujo ya que define la existencia, en el campo de luz, de un vector que al ser integrado en toda la superficie representa, proporcionalmente, la cantidad total de energía total que pasa por esa superficie en la unidad de tiempo.

La forma propuesta por Winston para definir el concepto de vector geométrico de flujo  $\vec{J}$  se obtiene aplicando la ley de conservación de étendue a un sistema óptico sin pérdidas. El elemento diferencial de étendue es,

$$dU = dp_x dp_y dx dy, \quad (2.4)$$

donde  $p_x$  y  $p_y$  son los cosenos ópticos directores, es decir los cosenos directores  $L, M$  multiplicados por el índice de refracción. La étendue total que entra a un sistema óptico se obtiene integrando:

$$U = \iiint dp_x dp_y dx dy \quad (2.5)$$

y permanece sin variaciones si no hay atenuación y si no hay rayos diafragmados que retornen hacia atrás. Como condición se va a emplear que la luz que entra en el sistema lo hace desde una fuente Lambertiana <sup>1</sup>, bajo

<sup>1</sup>fuente ideal donde el flujo por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada de la fuente es constante en todas direcciones. Un cuerpo negro ideal es Lambertiano ya

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

esta premisa se puede representar el emisor por haces uniformes de rayos distribuidos por la superficie. En este caso la  $dU$  es la medida del número de rayos entrando el elemento de superficie  $d_x d_y$  dentro del ángulo sólido que implica  $dp_x dp_y$ ,

$$dU = n^2 \cos \theta_z d\Omega dx dy, \quad (2.6)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo del haz elemental con el eje  $z$  y  $d\Omega$  es el ángulo sólido entre por  $dp_x$  y  $dp_y$ . Sustituyendo en la ecuación 2.4  $dp_x dp_y$  por  $\cos \theta_z dJ$  se puede escribir,

$$dU = \cos \theta_z dJ dx dy, \quad (2.7)$$

donde  $dJ$  representa el número de rayos en el mazo elemental [20]. Los componentes del vector geométrico de flujo son,

$$J_z = \int dp_x dp_y, J_x = \int dp_y dp_z, J_y = \int dp_x dp_z, \quad (2.8)$$

donde los componentes  $(J_x, J_y, J_z)$  del vector geométrico de flujo  $\vec{J}$  representan el flujo total por unidad de área entrando los planos  $yz$ ,  $xz$  y  $xy$  en el punto  $P(x,y,z)$  del espacio. Si se reescribe el componente del vector  $J_z$ ,

$$J_z = \int n^2 d\Omega \cos \theta_z, \quad (2.9)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo del haz respecto al eje  $z$ , se ve que  $J_z$  es proporcional a la iluminancia en el plano  $x, y$ .

Como se ha comentado P. Moon y D. Spencer [22] hablaron del concepto pharosage vector  $\vec{D}$  proveniente del griego pharos (faro) y el sufijo age (por unidad de área). Estos desarrollaron la teoría del campo fotónico ("Photonic Field") estudiando el campo del flujo de emisores Lambertianos. La única diferencia entre el vector geométrico de flujo y el vector pharosage es una constante  $k$  debida al empleo de distintas unidades, típicamente radiométricas para  $\vec{D}$  y en ocasiones sin asignar unidades concretas [20] en el vector geométrico de flujo debido a que en el diseño de concentradores no son necesarias.

$$\vec{D} = k \vec{J}. \quad (2.10)$$

### 2.1.2. Líneas de campo (líneas de flujo)

En los campos vectoriales empleados habitualmente (eléctrico, de fuerzas,...) la representación geométrica del campo se realiza mediante las líneas vectoriales o líneas de campo, para el caso del campo de luz estas líneas se denominan, en la literatura, líneas de flujo. A cada punto en el espacio del campo de luz le corresponde un valor y dirección del vector geométrico de flujo  $\vec{J}$ . De este modo es posible construir una línea de flujo como la línea

---

que la radiación en la cavidad es isotrópica

que, tangencialmente, va uniendo las direcciones del vector geométrico de flujo. De este modo el vector geométrico de flujo  $\vec{J}$  en cualquier punto  $P$  de la línea de campo o línea de flujo es tangente a la misma. El caso más simple es un emisor puntual, en este caso las líneas de flujo son radiales respecto a ese punto en todo el espacio debido a la contribución puntual de la fuente. Un caso más avanzado es el de un emisor Lambertiano con tamaño finito  $FF'$ , figura 2.2, donde las líneas de flujo son hipérbolas. Si se observa el punto  $Q$  cuando se acerca al emisor Lambertiano se aprecia que el ángulo  $\beta$  tiene un máximo de  $\pi$ , justo en el emisor la línea de flujo es perpendicular al mismo. El vector geométrico de flujo tiene la dirección de la bisectriz de los rayos que llegan al punto  $Q$  desde cada foco.

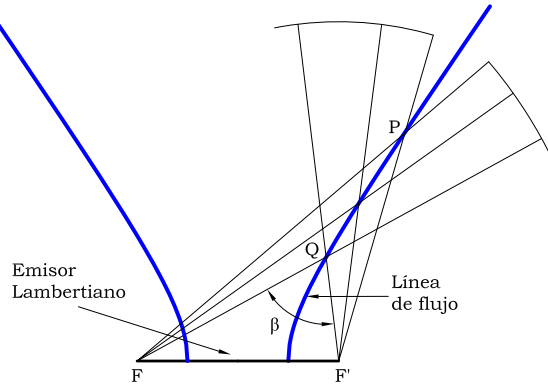


Figura 2.2: Líneas de flujo para emisor Lambertiano

La línea continua que une todas las direcciones de  $\vec{J}$  es la línea de flujo, cumpliéndose que los concentradores ideales tienen una forma que no entorpecen el campo del vector geométrico de flujo. Esta propiedad indica que una forma teórica de construir concentradores ideales es colocar espejos que sigan las líneas de flujo bajo condiciones de balance de rayos. Esta condición dice que debe haber para cada rayo  $r_1$  incidente en una cara de este espejo otro rayo  $r_2$  incidente en la otra cara del espejo de tal manera que la dirección de  $r_2$  corresponda con la dirección de la reflexión de  $r_1$ . Uno de los concentradores más extendidos, el CPC, procede del campo  $\vec{J}$  proporcionado por un emisor Lambertiano con la forma de un cono truncado en dos dimensiones, otro concentrador como el hiperboloide de revolución (hyperbolic trumpet) se obtiene al evaluar el campo  $\vec{J}$  de un emisor Lambertiano con la forma de un disco [5]. Este método es la base de un método más generalizado para diseño de concentradores, método del haz de rayos elíptico (elliptic ray bundle method) desarrollado y propuesto por M. Gutiérrez y P. Benítez [25, 26].

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

### 2.1.3. Propiedades del vector geométrico de flujo $\vec{J}$

En un medio sin atenuación, el que se emplea en este estudio,  $\vec{J}$  tiene una divergencia cero en regiones libres de fuentes de radiación o de sumideros,  $\nabla \cdot \vec{D} = 0$ . Por otro lado el rotacional de  $\vec{J}$  no es cero,  $\nabla \times \vec{D} \neq 0$ .  $\vec{J}$  es solenoidal pero no irrotacional, por ello no es derivable de un potencial escalar. Sólo tres campos particulares son irrotacionales, producidos por:

- plano infinito y uniforme
- cilindro infinito y uniforme
- esfera uniforme

Existen ciertas simetrías donde se puede estudiar el campo como un campo quasipotencial que satisfaga,

$$\vec{D} \cdot \nabla \times \vec{D} = 0 \quad (2.11)$$

Asimismo hay campos producidos por fuentes uniformes que su forma conforma a un determinado sistema de coordenadas ortogonales donde campos potenciales o quasipotenciales satisfacen la ecuación de Laplace. En otros casos es posible introducir un vector potencial  $\vec{A}$  que cumple  $\nabla \times \vec{A} = \vec{D}$ , para estos casos hay una ecuación del vector de Poisson para el campo [22]. La condición de contorno es que el vector  $\vec{D}$  a la salida de la fuente debe ser normal a la superficie de la misma.

### 2.1.4. Ratio de concentración

Un concentrador de radiación es un sistema óptico que tiene la capacidad de incrementar la cantidad de energía por unidad de área. Es conocido por todos como con una lente es posible concentrar la radiación solar sobre un papel incrementando la temperatura hasta llegar a quemarlo. Es conocida la referencia histórica sobre concentradores, no se sabe si es leyenda [27], donde el historiador Griego Lucian cuenta como Arquímedes crea durante el sitio de Siracusa un sistema con espejos ustorios para quemar las naves Romanas mediante la concentración de radiación solar. Los concentradores se puede subdividir en concentradores formadores de imagen y concentradores anidólicos, si bien es una subdivisión arbitraria en cierta manera ya que los principios ópticos funcionamiento son los mismos. Dentro de los anidólicos hay concentradores de extrusión, de rotación, asimétricos y “freeform”. Los concentradores de extrusión o lineales son construidos mediante la extrusión de un perfil hecho en dos dimensiones, el concentrador de revolución esta basado en el mismo perfil 2D pero revolucionado alrededor de un eje de simetría. Los concentradores asimétricos, como su nombre indica, no tienen necesariamente un eje de simetría, si bien podrían tener simetría en algún sistema de coordenadas específico. Los concentradores “freeform” como su nombre indica son diseñados sin restricciones en cuanto a su forma.

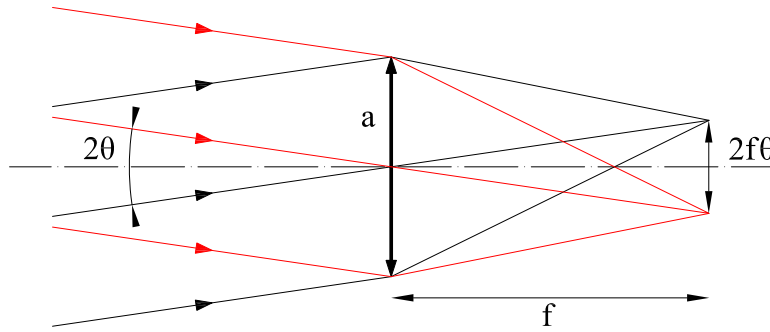


Figura 2.3: Objeto en infinito con extensión angular  $2\theta$

El ratio de concentración se define por,

$$C = \frac{A}{A'}, \quad (2.12)$$

ecuación que expresa la relación del área de entrada  $A$  con el área de salida  $A'$ . En aproximación paraxial y lente delgada  $C = (2a/2f\theta)^2 = (a/f\theta)^2$ . Si el ángulo de emisión de la fuente es fijo, como es el caso del Sol, y mantenemos el diámetro de la lente para ganar en concentración hay que reducir la distancia focal ya que al reducir la focal, como esta dividiendo, en la ecuación la concentración aumenta.

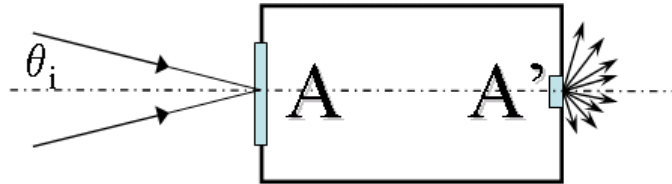


Figura 2.4: Área de entrada y salida para concentrador ideal

### 2.1.5. Invariante étendue. Concentración máxima teórica

Uno de los conceptos teóricos fundamentales en la descripción de los concentradores es el concepto de étendue, la luz al desplazarse en un sistema óptico necesita cierta área y también cierto espacio angular. En la figura 2.3 si el ángulo  $\theta$  entra dentro de la aproximación paraxial la imagen del objeto tiene un tamaño  $2f\theta$ . La extensión angular multiplicada por el diámetro de la lente, eliminando el factor 4, da  $n\theta a$  cantidad conocida con el nombre de étendue o aceptación la cual es proporcional al cuadrado del invariante de Lagrange. Esta concepto es importante ya que es un invariante para el sistema óptico aceptando ciertas restricciones como es la aproximación paraxial, que no exista absorción ni dispersión, etc. La étendue es una medida del paso de energía por un sistema óptico.

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

Se va a emplear la étendue en 3D para obtener el ratio teórico de concentración. Una fuente de luz esférica de radio  $r_{fuente}$  que esta emitiendo en todas direcciones, figura 2.5, va a iluminar una esfera  $A_{esf}$  de radio  $r_{esf}$  y, posteriormente, una esfera  $A'_{esf}$ . Cuando la luz llega al punto  $P_{esf}$  la luz llega con un ángulo  $2\theta_{esf}$ . Este ángulo se puede obtener como  $(r_{fuente}/r_{esf}) = \sin \theta_{esf}$ . El área  $A_{esf} = 4\pi r_{esf}^2$  como el  $\sin^2 \theta_{esf} = (r_{fuente}/r_{esf})^2$  se obtiene que,

$$A_{esf} \sin^2 \theta_{esf} = 4\pi r_{esf}^2 \left( \frac{r_{fuente}}{r_{esf}} \right)^2 = 4\pi r_{fuente}^2 = A_{fuente}. \quad (2.13)$$

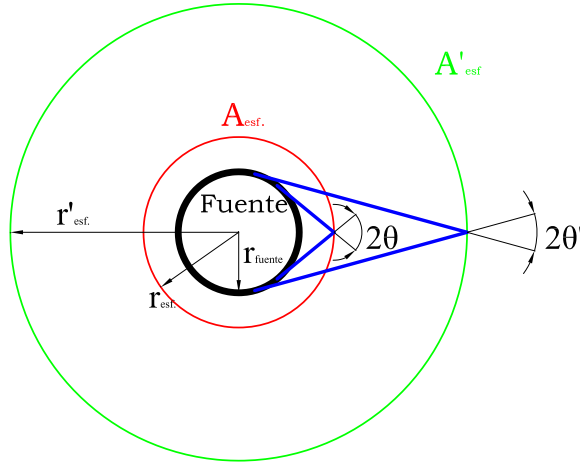


Figura 2.5: Emisor esférico

Haciendo los cálculos para la esfera  $A'$  se obtienen resultados iguales; es decir,

$$A \sin^2 \theta = A' \sin^2 \theta'. \quad (2.14)$$

Se puede demostrar que si están implicados los índices de refracción la étendue del sistema también se conserva con la siguiente formulación,

$$n^2 A \sin^2 \theta = n'^2 A' \sin^2 \theta', \quad (2.15)$$

operando se puede obtener el ratio teórico de concentración como,

$$\frac{A}{A'} = \left( \frac{n' \sin \theta'}{n \sin \theta} \right)^2, \quad (2.16)$$

si el  $\sin \theta' = \pi/2$  se obtiene el ratio teórico de concentración máximo en 3D como,

$$C_{max3D} = \left( \frac{n'}{n \sin \theta} \right)^2. \quad (2.17)$$

## 2.2. Concentradores Elípticos

### 2.2.1. Ratio elíptico de concentración

Para definir el ratio elíptico de concentración se va a aplicar el invariante de étendue a través de sistemas ópticos sin pérdidas [5]:

$$n^2 dx dy dL dM = n'^2 dx' dy' dL' dM', \quad (2.18)$$

donde  $n$  y  $n'$  son los índices de refracción del medio de entrada y el de salida,  $dx dy$  y  $dx' dy'$  son las correspondientes áreas de entrada y salida y  $dL dM$  y  $dL' dM'$  es la extensión angular de entrada y de salida. Integrando la ecuación 2.18 para áreas de entrada y salida de forma elíptica y considerando el caso general con dos ángulos diferentes de entrada y salida, se obtiene la siguiente expresión:

$$n^2 4\pi ab \sin \theta_a \sin \theta_b = n'^2 4\pi a' b' \sin \theta'_a \sin \theta'_b, \quad (2.19)$$

donde  $a$  y  $b$  son el eje mayor y menor de la apertura de entrada,  $a'$  y  $b'$  son en eje mayor y el menor de la apertura de salida,  $\theta_a$  y  $\theta'_a$  el la aceptación angular y el ángulo de salida en la dirección del eje mayor y  $\theta_b$  y  $\theta'_b$  es la aceptación transversal y ángulo de salida en la dirección del semi-eje menor.

Por definición el índice máximo de concentración es la relación entre el área de entrada dividida por el área de salida, se denota a este parámetro por  $C$ .

$$C = \frac{A}{A'}. \quad (2.20)$$

Partiendo de la ecuación 2.19 se obtiene el índice máximo de concentración,

$$C_{max.} = \frac{\pi ab}{\pi a' b'} = \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \frac{1}{\sin \theta_a} \frac{1}{\sin \theta_b}. \quad (2.21)$$

Esta ecuación muestra una nueva familia de concentradores que como principal característica tienen dos ángulos principales de aceptación, uno en el eje longitudinal y el otro en el transversal. De la ecuación 2.21 se pueden deducir dos casos particulares que son bien conocidos por haber sido estudiados en profundidad dada su extenso campo de aplicación industrial y práctico,

- si  $\theta_a = \theta_b$  se obtiene el índice de concentración teórico máximo para sistemas ópticos de revolución con eje de simetría.
- si  $\theta_a = \frac{\pi}{2}$  se obtiene el índice de concentración teórico máximo para sistemas ópticos lineales.

Esto implica que mediante la ecuación anterior se pueden analizar casos concretos de concentradores pasando de un sistema lineal a uno de revolución,



## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

opuestos en cuanto a su construcción geométrica, pasando por las infinitas opciones intermedias. Debido a la naturaleza geométrica de los mismos se han denominado concentradores elípticos (EC) [28].

Si se compara el  $C_{maximo}$  del concentrador elíptico respecto al sistema lineal en el que uno de los ángulos de aceptación es  $\frac{\pi}{2}$  y respecto al concentrador de rotación en el que  $\theta_a = \theta_b$ , si  $\frac{\pi}{2} > \theta_a > \theta_b$  se obtiene,

$$\left(\frac{n}{n'}\right)^2 \frac{1}{\sin \theta_b} < \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \frac{1}{\sin \theta_a} \frac{1}{\sin \theta_b} < \left(\frac{n}{n' \sin \theta_b}\right)^2. \quad (2.22)$$

Analizando los parámetros de concentración de los concentradores elípticos se puede deducir que los EC tienen un parámetro de concentración menor que el concentrador de rotación y mayor que el parámetro que tiene el concentrador lineal.

### 2.2.2. Concentradores en coordenadas elípticas cilíndricas

Para estudiar esta nueva familia de concentradores se va a emplear un sistema particular de coordenadas ortogonales en tres dimensiones para el que estos concentradores son simétricos. Se va a usar un sistema de coordenadas elípticas cilíndricas  $(u, v, z)$  y es el resultado de proyectar dos sistemas de coordenadas elípticas en la dirección perpendicular  $z$ . Este sistema de coordenadas, representado en la figura 2.6, posee las siguientes ecuaciones de conversión respecto al sistema  $(x, y, z)$ :

$$\begin{aligned} x &= c \cosh u \cos v, \\ y &= c \sinh u \cos v, \\ z &= z \end{aligned} \quad (2.23)$$

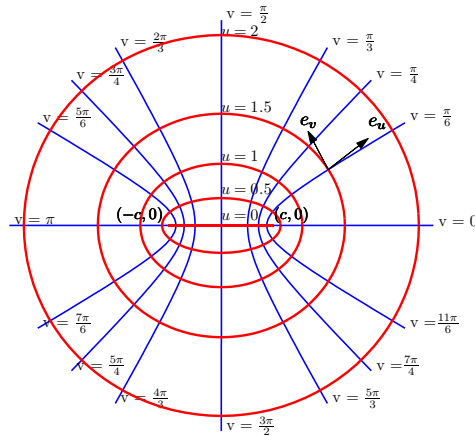


Figura 2.6: Sistema de coordenadas elípticas cilíndricas  $(u, v, z)$  de longitud focal  $c = 1$

El parámetro del que depende el sistema de coordenadas elípticas cilíndricas es la focal  $c$ . Se observa que si  $c$  tiende a 0 este sistema se torna en un sistema de coordenadas cilíndricas estándar. Por otro lado si  $c$  tiende a infinito este sistema pasa a ser un sistema de coordenadas Cartesianas. Este comportamiento permite considerar los EC como complementarios entre los concentradores de extrusión y los de rotación. Así pues la ecuación 2.21 puede considerarse como una expresión generalizada para el ratio máximo teórico de concentración.

### 2.2.3. Concentradores elípticos, homofocales y no homofocales

Los concentradores elípticos se dividen en dos tipos según su tratamiento con la focal, homofocales y no homofocales. Los concentradores elípticos homofocales mantienen la focal  $c$  de todas las elipses que constituyen las secciones horizontales del sistema. En el caso de los concentradores elípticos no homofocales, estas focales varían a lo largo de la altura del sistema con lo que es diferente para cada elipse que compone el sistema. Esta variación en la geometría provoca una variación en el comportamiento de ambos sistemas como se verá más adelante.

#### ■ Concentradores elípticos homofocales

Un hecho importante para definir el estudio de estos nuevos componentes ópticos es la simetría de los EC en un sistema de coordenadas elípticas cilíndricas. Los EC homofocales tienen simetría de rotación en el sistema de coordenadas elípticas cilíndricas cuando se mueven a lo largo de la coordenada angular  $v$ ,  $v \in (0, 2\pi)$ , debido a esto la geometría del concentrador permanece inalterada [29], de la misma manera que un concentrador de eje simétrico tiene simetría rotacional en el sistema de coordenadas cilíndricas. La consecuencia principal de esta simetría, debido a la óptica hamiltoniana, es que va a existir un invariante para cada rayo que se propague a través de estos concentradores. Para simetría rotacional este invariante se denomina invariante no meridional (skew invariant)  $h$  [5], para el caso elíptico, podemos expresar este invariante como,

$$h = u_{min} k_v, \quad (2.24)$$

donde se ha reemplazado el radio cilíndrico  $r_{min}$  por el radio elíptico  $u_{min}$ ,  $k_v$  es el componente de  $\vec{k}$  en la dirección tangencial  $\mathbf{v}$  donde  $\vec{k}$  es un vector de magnitud igual al índice de refracción orientado a lo largo de la dirección de propagación del rayo.

El invariante no meridional (skew invariant)  $h$  pasa a ser el invariante de extrusión cuando  $c \rightarrow \infty$  y pasa a ser el invariante de rotación cuando  $c \rightarrow 0$ . Se va a introducir el invariante  $h' = \tanh(c) \cosh(u_{min}) k_v$  siguiendo un método como el propuesto por Miñano [30] para el sistema de coordenadas toroidal. Este invariante se conserva para rayos propagándose a través

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

del concentrador donde  $c$  es una constante. Usando el siguiente cambio de variables,

$$\begin{aligned}\lambda &= \cosh(u), \\ \mu &= \cos(v),\end{aligned}\tag{2.25}$$

e introduciendo estas nuevas variables en la ecuación 2.23 se obtiene:

$$\lambda^2 = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{x^2 + y^2}{c^2} + 1 \right) + \left[ \left( \frac{x^2 + y^2}{c^2} + 1 \right)^2 - \frac{4x^2}{c^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \tag{2.26}$$

ecuación que relaciona las coordenadas elípticas cilíndricas con del sistema de coordenadas cartesiano. De esta ecuación es posible evaluar los límites para  $h'$ , obteniendo el invariante no meridional de traslación (translational skew invariant) ( $k_v$ ) cuando  $c \rightarrow \infty$  y el invariante no meridional de rotación (rotational skew invariant) ( $r_{min}k_v$ ) cuando  $c \rightarrow 0$ . El invariante  $h'$  es válido para los denominados Concentradores Elípticos homofocales, en estos concentradores todas las secciones son elipses con la misma distancia focal  $c$ .

### ■ Concentradores Elípticos No Homofocales (ECNH)

Los EC no homofocales no mantienen la focal en todas las elipses que conforman las secciones horizontales, esto provoca que en comparación con los EC homofocales tengan un comportamiento distinto a nivel óptico. Los EC no homofocales van a poder llegar a un ratio de concentración cercano al máximo teórico mostrado anteriormente en la ecuación 2.21. En función de la relación entre la apertura de entrada y salida se pueden estudiar los siguientes casos:

Primer caso EC no homofocal:  $a > b$  y  $a' = b'$ , se trata de un concentrador con una apertura de entrada elíptica y una apertura de salida de carácter circular. Debido a su geometría este tipo de concentrador es no homofocal, la relación entre  $\theta_a$  y  $\theta_b$  es

$$\frac{n'}{n \sin \theta_a} = \frac{a}{a'} > \frac{b}{b'} = \frac{n'}{n \sin \theta_b}, \tag{2.27}$$

lo que implica que  $\theta_a < \theta_b$ .

La figura 2.7 muestra una representación geométrica de esta relación usando CPCs, para dos CPCs en 2D con sus focos  $F$  localizados en la misma posición y la misma apertura de salida. Como ya se ha deducido el que tiene una apertura de entrada de mayor longitud tiene un ángulo de aceptación menor y a la inversa. En la sección 2.2.4 (página 40) se va a realizar un estudio mediante trazado de rayos con TracePro [31] de un concentrador de este tipo.

## 2.2 Concentradores Elípticos

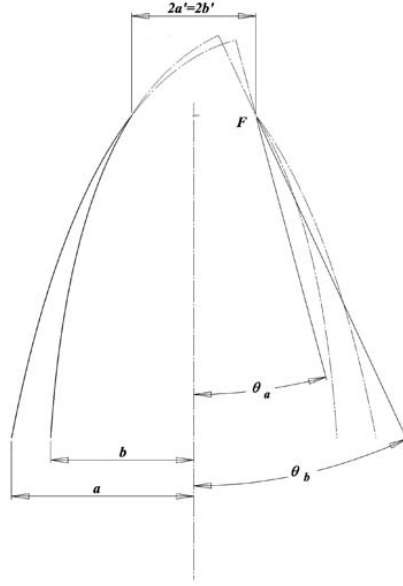


Figura 2.7: Parámetros geométricos de un CPC elíptico no homofocal con entrada elíptica y salida circular

Segundo caso EC no homofocales: se trata de un concentrador no homofocal con entrada y salida elípticas con  $a > b$  y  $a' > b'$ , en este caso la relación de  $\theta_a$  y  $\theta_b$  depende de los valores de  $a, b, a'$  y  $b'$ , por lo que será posible diseñar concentradores de estas características:  $\theta_a > \theta_b, \theta_a = \theta_b, \theta_a < \theta_b$ .

Tercer caso EC no homofocales:  $a = b$  y  $a' > b'$ , se tiene una apertura de entrada circular y una pupila de salida elíptica,

$$\frac{n'}{n \sin \theta_a} = \frac{a}{a'} < \frac{b}{b'} = \frac{n'}{n \sin \theta_b}, \quad (2.28)$$

lo que proporciona  $\theta_a > \theta_b$ . En la figura 2.8 se observa una representación geométrica de este caso.

Cuarto caso EC no homofocales:  $a > b$  y  $a' < b'$ , se trata de un concentrador elíptico no homofocal con los ejes cruzados, en este caso  $\theta_a < \theta_b$ .

A modo de resumen se presenta una tabla esquemática, tabla 2.1, que muestra los casos particulares tanto de concentradores elípticos homofocales como de los no homofocales.

Homofocalidad	No	No	No	Sí	Sí	No
Apertura entrada	$a > b$	$a > b$	$a = b$	$a = b$	$a = a'$	$a > b$
Apertura salida	$a' > b'$	$a' = b'$	$a' > b'$	$a' = b'$	$\rightarrow \infty$	$a' < b'$
Aceptancia angular	...	$\theta_a < \theta_b$	$\theta_a > \theta_b$	$\theta_a = \theta_b$	$\theta_a = \frac{\pi}{2}$	$\theta_a < \theta_b$

Tabla 2.1: Relación entre  $\theta_a$  y  $\theta_b$  para los distintos tipos de concentradores

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

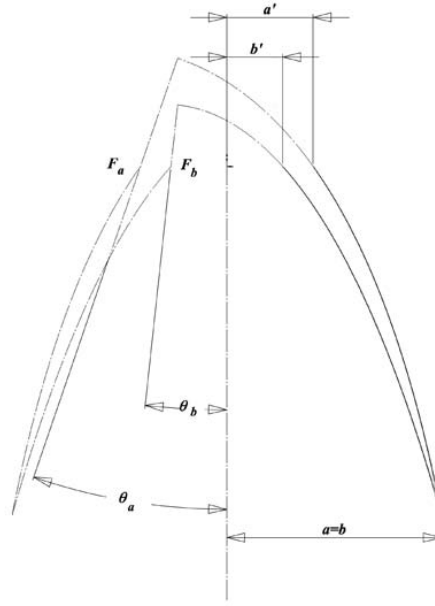


Figura 2.8: Parámetros geométricos de CPC elíptico no homofocal con entrada circular y salida elíptica

### 2.2.4. Simulación: concentrador parabólico compuesto elíptico (ECPC)

En este apartado se estudia mediante trazado de rayos el CPC en su configuración elíptica, Concentrador Parabólico Compuesto Elíptico (ECPC).

La ecuación del ECPC, ecuación 2.29, en coordenadas elípticas cilíndricas es equivalente a la ecuación del CPC, por ello se sustituye el radio estándar  $r$  por el radio elíptico  $u$  y la apertura  $a'$  se sustituye por el radio elíptico de la apertura de salida.

$$(u \cos \theta_{max} + z \sin \theta_{max})^2 + 2u_0(1 + \sin \theta_{max})^2 u - 2u_0 \cos \theta_{max}(2 + \sin \theta_{max})^2 z - u_0^2(1 + \sin \theta_{max})(2 + \sin \theta_{max}) = 0, \quad (2.29)$$

Se ha evaluado la transmitancia longitudinal y transversal mediante trazado de rayos con TracePro [31] para cuatro ECPCs homofocales. Se puede diseñar en 3D este tipo de concentradores en su forma homofocal por rotación de un perfil 2D de un CPC estándar en el sistema de coordenadas elípticas cilíndricas. Otra forma de construir un ECPC en 3D es elegir el perfil 2D y calcular cada sección del concentrador que en este caso serán elipses con su eje menor y eje mayor definidos por el perfil CPC, con la distancia focal, parámetro  $c$ , definido por las coordenadas elípticas cilíndricas. Los ECPC se han diseñado con Matlab usando las ecuaciones expuestas anteriormente y su paso a 3D es hecho mediante conversión a estereolitografía de la nube de puntos generada. Para minimizar el tiempo de cálculo se ha de

## 2.2 Concentradores Elípticos

reducir el número de facetas generadas en el diseño ya que el software ha de procesar la normal a cada una de ellas, en el apéndice A se ha realizado un estudio que relaciona el tiempo de cálculo con el número de facetas. Asimismo se ha comprobado la trazabilidad de las medidas para asegurar que el procedimiento es preciso, para ello se ha calculado un supuesto conocido, en este caso un CPC 3D, dando resultados coherentes en transmitancia angular y en eficiencia. Se ha ajustado el número de facetas a un rango superior al margen establecido para no incurrir en errores.

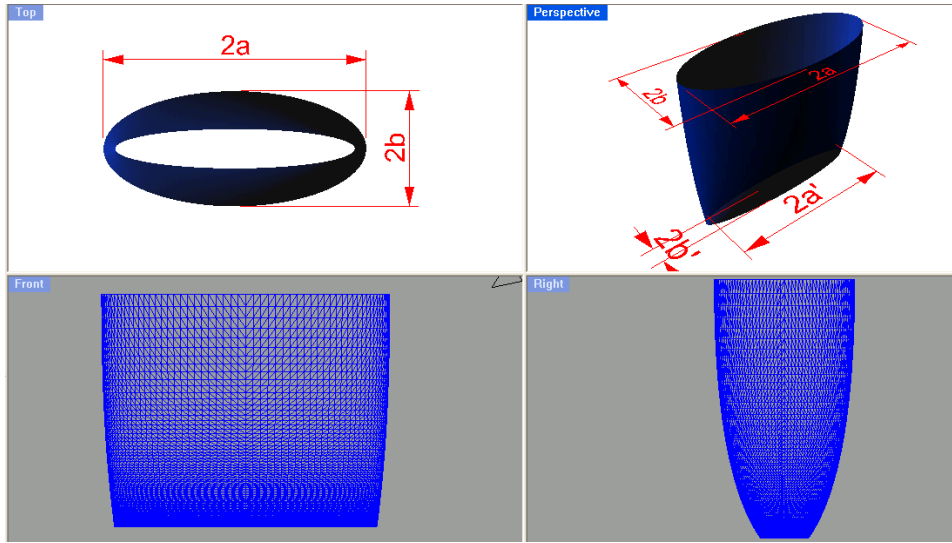


Figura 2.9: Diseño 3D ECPC con focal 60

La figura 2.9 muestra planta, alzado, perfil y perspectiva de un ECPC homofocal donde se observan las facetas generadas en su diseño.

Ángulo perfil transversal ( $^{\circ}$ )	Apertura salida (mm)	Distancia focal (mm)	Ángulo long. máx. ( $^{\circ}$ )	Ángulo transv. máx. ( $^{\circ}$ )
20	20	99	74.6	20
20	20	60	65.7	20
20	20	30	49	20
20	20	0	20	20

Tabla 2.2: ECPC calculados

En la tabla 2.2 se aprecia que el ángulo transversal máximo es de  $20^{\circ}$  para todos los concentradores, el ángulo longitudinal se ha calculado con la expresión  $\sin(\theta_{max}) = \frac{a'}{a}$  [5] y varía para cada concentrador.

Las figuras 2.10 y 2.11 muestran la transmitancia transversal y longitudinal de los ECPC descritos en la tabla 2.2. La transmitancia longitudinal es el eje más largo del sistema. En la figura 2.11 se observa que hay una transmitancia claramente diferenciada según el tipo de concentrador estudiado, la cual es controlable mediante un único parámetro, la distancia focal. Una

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

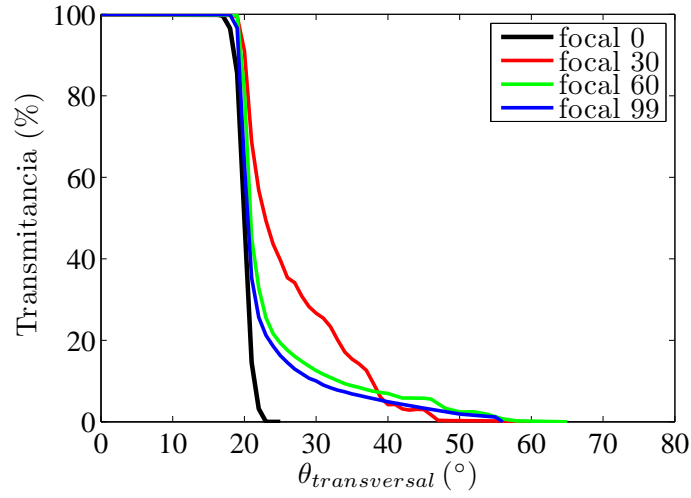


Figura 2.10: Transmitancia para 4 ECPC focales 0, 30, 60 y 99 homofocales, eje transversal

distancia focal  $\rightarrow 0$  dará una desviación angular menor entre las curvas longitudinales y transversales, llegando a ser iguales si la distancia focal es igual a cero, en cuyo caso el ECPC pasa a ser un CPC de revolución estándar.

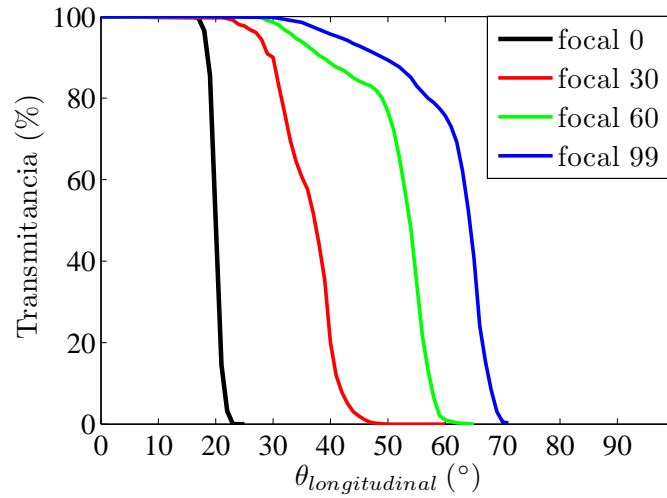


Figura 2.11: Transmitancia para 4 ECPC focales 0, 30, 60 y 99 homofocales, eje longitudinal

Por otro lado es posible diseñar ECPCs no homofocales de una forma similar a la que utilizamos para hacer los homofocales. En vez de definir la sección elíptica del concentrador por su eje menor o eje mayor y su distancia focal debemos definir su eje menor y su eje mayor de manera que estos

## 2.2 Concentradores Elípticos

ejes sigan dos CPCs cruzados -definidos en 2D-. La figura 2.12 muestra las curvas de transmitancia para un ECPC no homofocal que tiene un CPC de  $40^\circ$  como curvatura en el eje menor en la elipse (corresponde al eje transversal) y en el eje mayor la curvatura esta definida por un CPC de  $20^\circ$ . Este ECPC tendrá una salida circular de radio 10 mm. Al estar compuesto de dos CPCs de distinto ángulo de diseño, y por lo tanto dos alturas, se tiene un sistema con una pupila de entrada con una altura variable en forma de “S”, para evitar este diseño que compromete su aplicabilidad se realiza un truncamiento en el eje longitudinal, dejando la diferencia de alturas entre ambos ejes enrasada. Este truncamiento dejará en ángulo máximo de aceptación en  $\theta_{maxtransv.} = 40^\circ$  y  $\theta_{maxlong.} = 24.1^\circ$ .

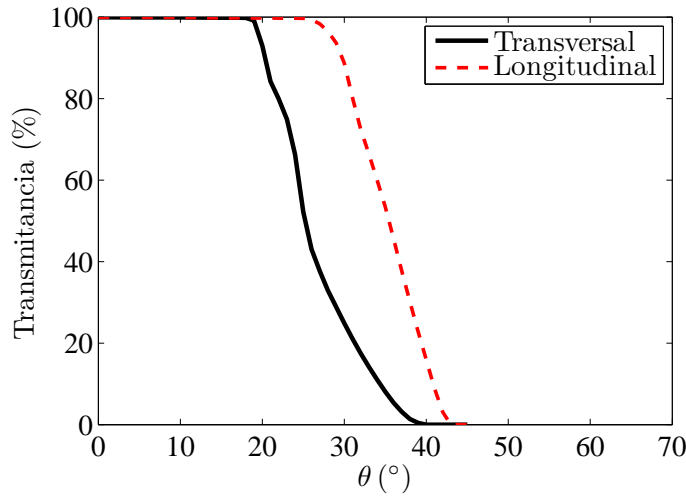


Figura 2.12: Transmitancia para un ECPC no homofocal, eje transversal y longitudinal

En las curvas de transmitancia de la figura 2.12 se observa un comportamiento distinto en cada eje, se ve que el eje transversal cuyo ángulo teórico  $\theta_{max} = 40^\circ$  esta ajustado al cálculo, en cambio el eje longitudinal no concuerda correctamente con el ángulo teórico obtenido. El ajuste entre el diseño teórico y calculado es mejor en el caso del concentrador homofocal.

### 2.2.5. Aplicaciones de los concentradores elípticos

Se ha presentado el estudio teórico de los concentradores EC. Una vez conocido el funcionamiento de este tipo de sistemas es posible identificar las posibles aplicaciones. Para óptica de no imagen se deben diferenciar dos aplicaciones principales: primero como concentradores solares sin seguimiento debido a la capacidad de una aceptación angular que varia en los ejes según el diseño, la segunda aplicación inmediata sería como componentes ópticos para iluminación con fuentes como diodos emisores de luz (LEDs) o



## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

diodos láser, pensando que el sistema va a trabajar en modo inverso.

Los sistemas concentradores sin seguimiento (“nontracking”) no necesitan ser acoplados a sistemas de apuntamiento para que sigan el movimiento solar a lo largo del día. Estos sistemas se describen como óptica pasiva, en la literatura se han propuesto muchos concentradores pasivos [32, 33] pero todos ellos son sistemas basados en concentradores de extrusión. El ahorro de costes tanto en inversión como en mantenimiento puede hacer que en determinados casos sea adecuado el uso de concentradores EC ya que la ecuación 2.22 demuestra ratios de concentración mayores que los obtenidos con concentradores de extrusión. Asimismo hay aplicaciones en las que no es necesario cubrir el rango completo de movimiento solar por lo que un diseño *ad hoc* con EC sería mucho más adecuado por el aumento en concentración y el ahorro de costes asociado a los sistemas pasivos.

Como segunda aplicación principal se propone el uso de los EC como componentes para iluminación. Los sistemas de óptica anidólica se han usado como componentes ópticos para acoplamientos de fibra óptica con LEDs y también para obtener distribuciones uniformes de luz en el empleo de diodos láser [34, 35]. De forma similar los EC pueden usarse iluminadores. El uso de estos sistemas proporciona nuevas capacidades con sistemas reflexivos como por ejemplo haces de luz astigmáticos con uniformidades controladas. Aplicaciones en automoción o en señalización vial para carreteras [36, 37] donde generalmente se emplean haces de luz de ángulo variable (transversal y longitudinalmente) son indicadas para los concentradores elípticos.

### 2.3. Concentrador asimétrico ideal en 3D

#### 2.3.1. Concentrador asimétrico ideal en 3D

Se han utilizado los resultados de la teoría de campo de luz para estudiar las líneas de flujo generadas por un disco elíptico, estas líneas de flujo definen un concentrador de radiación para fuente finita. Se va a demostrar que es un concentrador ideal en tres dimensiones. V. Fock [38] introdujo en 1924 el concepto de vector potencial que también fue aplicado por P. Moon y D. E. Spencer. El teorema de Stokes permite sustituir la integral de superficie empleada tradicionalmente para calcular el vector geométrico de flujo  $\vec{J}$  por una integral de contorno alrededor del borde de la fuente,

$$\int_s \text{rot}(\vec{v}) \cdot d\vec{s} = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l}. \quad (2.30)$$

El vector geométrico de flujo en un punto  $P$  es,

$$\vec{J} = L \int_s \frac{\vec{r}_1 \cos \theta}{r^2} ds = L \int_s \frac{\vec{r}_1}{r^2} (\vec{r}_1 \cdot \vec{n}_1) ds, \quad (2.31)$$

donde  $L$  es la radiancia de la fuente,  $\vec{r}_1$  es el vector unitario en la dirección de  $r$ ,  $\vec{n}_1$  es el vector normal de la superficie,  $\theta$  es el ángulo entre  $\vec{r}_1$  y  $\vec{n}_1$ , figura 2.13.

### 2.3 Concentrador asimétrico ideal en 3D

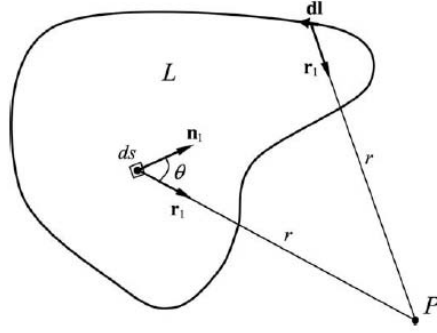


Figura 2.13: Parámetros integración de contorno

Para operar se va a multiplicar por un vector unitario  $\vec{N}_1$ ,

$$\vec{N}_1 \cdot \vec{J} = L \int_s \frac{1}{r^2} (\vec{N}_1 \cdot \vec{r}_1) (\vec{r}_1 \cdot \vec{n}_1) ds = L \int_s \vec{n}_1 \left( \frac{\vec{r}_1}{r^2} (\vec{N}_1 \cdot \vec{r}_1) \right) ds \quad (2.32)$$

Para introducir el teorema de Stokes debemos expresar el integrando de la ecuación 2.32 como el rotacional de algo, Gershun encontró que:

$$\frac{1}{2} \text{rot} \left( \frac{\vec{r}_1}{r} \times \vec{N}_1 \right) = \frac{\vec{r}_1}{r^2} (\vec{N}_1 \cdot \vec{r}_1) \quad (2.33)$$

Sustituyendo,

$$\vec{N}_1 \cdot \vec{J} = \frac{L}{2} \int_s \text{rot} \left( \frac{\vec{r}_1}{r} \times \vec{N}_1 \right) ds \quad (2.34)$$

Ahora se puede aplicar el teorema de Stokes de manera que,

$$\int_s \text{rot} \left( \frac{\vec{r}_1}{r} \times \vec{N}_1 \right) ds = \oint \frac{\vec{r}_1}{r} \times \vec{N}_1 \cdot \vec{dl} \quad (2.35)$$

obteniendo,

$$\vec{N}_1 \cdot \vec{J} = \frac{L}{2} \oint \frac{\vec{r}_1}{r} \times \vec{N}_1 \cdot \vec{dl} = k \vec{N}_1 \cdot \frac{L}{2} \oint \vec{dl} \times \frac{\vec{r}_1}{r} \quad (2.36)$$

Finalmente como  $L$  es constante ya que la superficie es Lambertiana evaluando la integral de la irradiancia en una fuente de luz de radiancia uniforme en cualquier punto  $P$  (figura 2.13) se obtiene que el vector geométrico de flujo es,

$$\vec{J} = \frac{L}{2} \oint \vec{dl} \times \frac{\vec{r}_1}{r} \quad (2.37)$$

Como  $\frac{\vec{r}_1}{r} = \text{grad}(\ln r)$  y teniendo en cuenta que  $\text{grad}(u \times v) = \text{rot}(uv) - u \text{rot}(v)$ , la ecuación 2.37 puede escribirse como:

$$\vec{J} = -\frac{L}{2} \oint \text{rot}(\ln r \vec{dl}) = \text{rot} \left( -\frac{L}{2} \oint \ln r \vec{dl} \right), \quad (2.38)$$

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

así que  $k\vec{J} = \text{rot}(\vec{A})$  de donde se puede introducir la expresión obtenida por Fock para el vector potencial:

$$\vec{A} = -\frac{L}{2} \oint \ln r d\vec{l} \quad (2.39)$$

De la ecuación 2.39 V. Fock [38] estudió ejemplos de la distribución del vector  $\vec{J}$  desde un disco elíptico con una radiancia constante (fuente Lambertiana) y demostró que este vector es siempre ortogonal a elipsoides de ecuación:

$$\frac{x^2}{\lambda} + \frac{y^2}{\lambda - c^2} + \frac{z^2}{\lambda - a^2} = 1, \quad \text{donde } \infty > \lambda > a^2, \quad (2.40)$$

donde  $\lambda$  es el parámetro para superficies elípticas confocales,  $a$  y  $b$  son los semiejes mayor y menor del disco elíptico y la focal  $c^2 = a^2 - b^2$ . Según esto las superficies definidas por la dirección del vector geométrico de flujo  $\vec{J}$ , ortogonal a los elipsoides son por definición elipsoides de una hoja de ecuación,

$$\frac{x^2}{\mu} + \frac{y^2}{\mu - c^2} + \frac{z^2}{\mu - a^2} = 1, \quad \text{donde } a^2 > \mu > c^2, \quad (2.41)$$

teniendo en cuenta que se ha usado un disco elíptico de emisión Lambertiana que cumple la condición de balance de rayos y usando la propiedad principal del vector  $\vec{J}$  se puede decir que los concentradores basados en un hiperboloide de una hoja son concentradores con un ratio teórico de concentración máximo. Esto equivale a decir que un concentrador hiperboloide de una hoja es un concentrador elíptico no homofocal ideal para fuentes finitas.

Por otro lado es posible llegar al mismo resultado aplicando el método de mazos elípticos de rayos descrito por Gutiérrez [25] si los parámetros del mazo son:  $a = 1$ ,  $b_1 = b_2 = b_3 = d = k = l = n = 0$ ,  $m = a^2$ ,  $p = b^2$  en la matriz  $\mathbf{G}^{-1}$ .

### 2.3.2. Propagación de rayos, hiperboloide de una hoja

Una vez que se ha demostrado teóricamente mediante campo de luz que el hiperboloide de una hoja es un concentrador ideal se va a estudiar la propagación de rayos para verificar el comportamiento de este tipo de concentradores. La ecuación de un hiperboloide de una hoja puede escribirse como,

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (2.42)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los parámetros geométricos del concentrador. De la definición de un hiperboloide de una hoja las secciones meridionales son hipérbolas con distintas distancias focales cuyos focos están localizados en una elipse de semiejes  $\sqrt{a^2 + c^2}$  y  $\sqrt{b^2 + c^2}$ . Esta elipse forma lo que se ha llamado receptor virtual elíptico [39] situado en la pupila de salida. La propiedad

## 2.3 Concentrador asimétrico ideal en 3D

básica de un reflector hiperbólico en 2D indica que un rayo dirigido hacia este receptor, que entra por la pupila de entrada del sistema y que incide en la hipérbola es dirigido por reflexión hacia un punto de este receptor. Sin embargo se ha de probar que todos los rayos siguen este comportamiento no sólo los meridianales como ocurre en el caso de dos dimensiones. Para ello tres propiedades de este concentrador son de utilidad:

- Las secciones verticales meridionales son hipérbolas
- Las secciones horizontales son elipses
- Un plano tangente en el punto  $P$  es definido por la bisectriz  $FPF'$  donde  $F$  y  $F'$  son los focos de la hipérbola en el plano meridional como se observa en la figura 2.14.

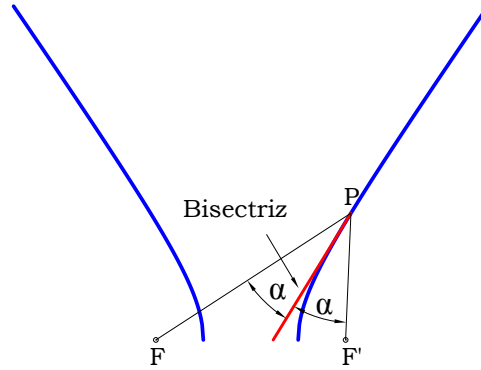


Figura 2.14: Bisectriz en  $P$  para sección hiperbólica

Todos los rayos no meridianales que inciden en  $P$  y van dirigidos al receptor virtual elíptico generan un cono elíptico de rayos. El cono reflejado es una imagen especular del cono incidente justo en la tangente del punto  $P$ . Por la geometría de este sistema la sección horizontal de este mazo de rayos es una elipse, figura 2.15. Uno de los ejes principales de la elipse recae en el plano tangente del hiperboloide de una hoja y por definición la bisectriz también, por ello el plano tangente coincide con un plano de simetría del cono incidente. Esto produce que el cono reflejado coincida con el cono incidente lo que implica que los rayos dirigidos al receptor virtual elíptico son reflejados por el concentrador a algún punto de este receptor. Por ello la propagación de rayos prueba que el hiperboloide de una hoja es un concentrador ideal en 3D.

### 2.3.3. Simulación 3D hiperboloide de una hoja

Para comprobar el comportamiento óptico del concentrador se ha estudiado la eficiencia angular mediante trazado de rayos por ordenador. Al ser concentradores para fuente cercana con la particularidad de que los rayos

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

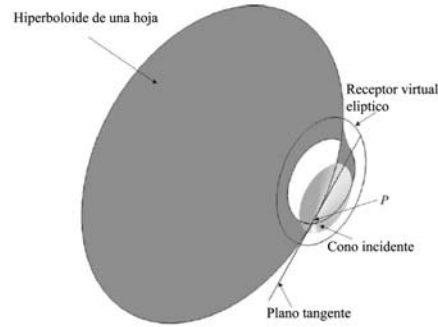


Figura 2.15: Vista frontal del cono incidente

que son efectivos son los dirigidos al receptor virtual es necesario realizar trazados adicionales que indiquen la cantidad de rayos que llegan al receptor sin el concentrador y la cantidad de rayos que llegan al mismo receptor con el concentrador, este cociente dará la eficiencia del sistema para cada ángulo trazado. Los parámetros empleados en la simulaciones son reflectancia  $\rho = 1$ ,  $a = 50$  mm,  $b = 25$  mm,  $c = 30$  mm y altura  $h = 70$  mm, figura 2.16.

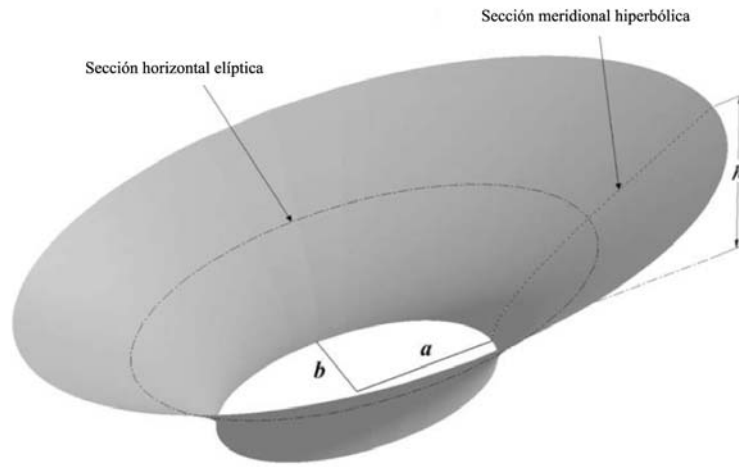


Figura 2.16: Parámetros hiperboloide de una hoja

Se ha trazado un haz colimado de rayos que llena por completo la apertura de entrada del concentrador para los diferentes ángulos de estudio,  $0^\circ$  a  $80^\circ$ , y se ha calculado la eficiencia del sistema. En la figura 2.17 se observa la eficiencia del concentrador para los distintos ángulos de incidencia (elevación) y los distintos ángulos acimutales, variando de  $0^\circ$  que es el semieje menor a  $90^\circ$  que es el semieje mayor. Calculando el dato de aceptación angular para el semieje menor se obtiene que  $\theta_{max} = 55.7$  y para el semieje mayor  $\theta_{max} = 69.3$ . Se observa que en los datos simulados por ordenador, figura 2.17, hay una caída brusca de eficiencia, típica del comportamiento

## 2.4 Concentrador hiperparabólico (HPC)

ideal de un concentrador en la zona esperada para los cuatro acimut simulados. Esto demuestra el comportamiento ideal en tres dimensiones para una reflectancia unidad. En el caso de una situación real de fabricación con una reflectancia menor que la unidad el comportamiento variaría ya que al ser un hiperboloide puede haber un gran número de reflexiones que disminuyan la eficiencia, esto no implica que no sea considerado un concentrador ideal desde el punto de vista teórico. Hay pequeños errores de simulación ( $< 1\%$ ) en la zona próxima a la caída que indican eficiencias mayores que 1, esto es debido al diseño con facetas finitas de la superficie 3D del concentrador, debido a la pequeña incertidumbre de cálculo y al incremento exponencial en tiempo de cálculo que implica el aumento de la precisión con un mayor número de facetas se ha estimado adecuada la incertidumbre de la simulación.

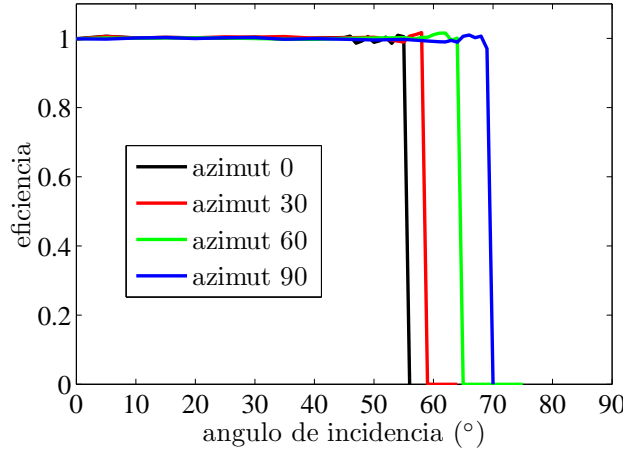


Figura 2.17: Transmitancia hiperboloide de una hoja ( $0^\circ$  es el semieje menor,  $90^\circ$  el mayor)

Un hiperboloide de una hoja es un concentrador ideal en 3D para fuente cercana. Para aplicaciones de concentración sin seguimiento (non-tracking) es necesario un concentrador de fuente infinita, para conseguir esto en el caso de este concentrador se debería añadir una lente asimétrica en la apertura de entrada de manera similar a la propuesta por O’Gallagher [40].

## 2.4. Concentrador hiperparabólico (HPC)

### 2.4.1. Diseño mediante campo de luz

El campo producido por un emisor Lambertiano en forma de cono truncado [6] permite obtener la geometría de un CPC si la línea de flujo parte del vértice del cono. Es posible obtener una nueva familia de concentradores a partir del estudio del campo de un emisor Lambertiano en forma de cono

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

truncado. Este nuevo concentrador se diseña a partir de las líneas de flujo que comienzan encima del cono truncado y no en el vértice como se muestra en la figura 2.18.

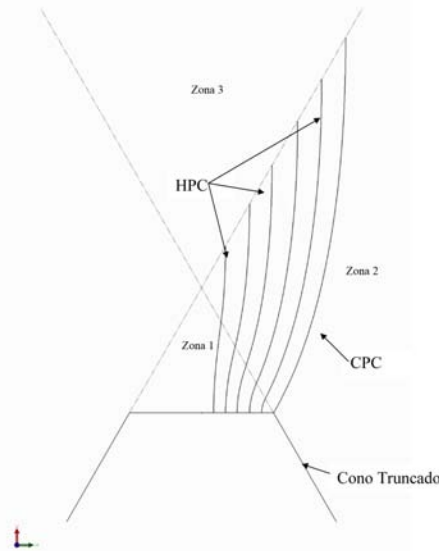


Figura 2.18: Líneas de flujo para cono truncado. HPC y CPC.

Se deben considerar distintas zonas para calcular el vector geométrico de flujo.

- En la zona 1 sólo llega radiación de la parte del cono que es un segmento finito por ello las líneas de flujo serán hipérbolas confocales con focos en los vértices del cono.
- En la zona 2 llega flujo desde un segmento semi-infinito lo que provoca que en esta región se tengan parábolas confocales con focos en los vértices y el eje de giro paralelo al segmento izquierdo del cono truncado.
- En la zona 3 llega flujo desde un segmento infinito por lo que son líneas verticales (no se han dibujado en la figura).

Las líneas de flujo que comienzan en el vértice del cono truncado definen el CPC pero las líneas de flujo que aparecen hacia la zona interior definen un nuevo tipo de concentrador que se ha denominado concentrador hiper-parabólico (HPC) [41, 42, 43] con comportamiento óptico distinto al CPC como se verá después.

Este nuevo concentrador tiene la forma de una hipérbola unida tangencialmente con una parábola girada con sus focos situados en el vértice del cono truncado y con cambio de dirección por lo que la ecuación que lo define es de orden superior a 2.

## 2.4 Concentrador hiperparabólico (HPC)

La unión de ambas cónicas debe cumplir tres condiciones:

- 1. El foco de la hipérbola  $F'$  y el foco de la parábola  $F_p$  deben coincidir.
- 2. El punto de unión está definido por una línea que parte del foco de la hipérbola con un ángulo  $\theta$  cortando el eje de la hipérbola.
- 3. El eje de la parábola pasa por su foco  $F_p$  y tiene un ángulo  $\theta$  respecto al eje de la hipérbola.

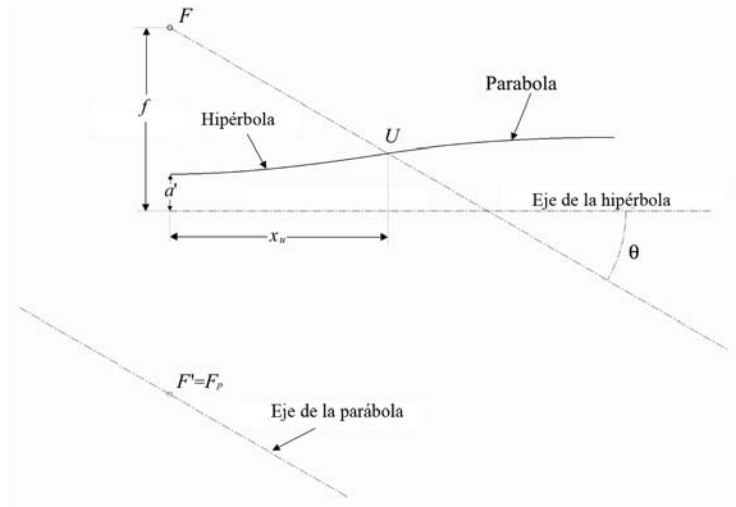


Figura 2.19: Geometría HPC

Como se observa en la geometría del HPC, figura 2.19, hay un punto de inflexión en ambas curvas,  $U$ , eso prueba que la ecuación de este nuevo concentrador es de orden superior a 2. Los puntos iniciales y finales de la curva tienen pendiente 0. Con esta geometría en el caso límite de que la distancia focal de la hipérbola sea igual al radio de apertura  $f = a'$  el HPC pasa a ser un CPC. Debido a su diseño geométrico es fácil probar que en 2D es un concentrador ideal. Los rayos que inciden en la apertura de entrada en un HPC 2D con ángulo menores o iguales a  $\theta$  son reflejados por la sección parabólica del concentrador hacia el segmento  $F - F'$ , si hay una reflexión adicional en la hipérbola como los rayos van dirigidos al receptor virtual también serán redirigidos nuevamente al segmento anterior, por ello después de  $n$  reflexiones la radiación llega a la salida del sistema.

La construcción de un HPC puede ser mediante:

- rotación simétrica, obteniéndose un HPC 3D
- extrusión, obteniéndose un HPC 2D o de extrusión
- simetría elíptica, obteniéndose un HPC elíptico



## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

---

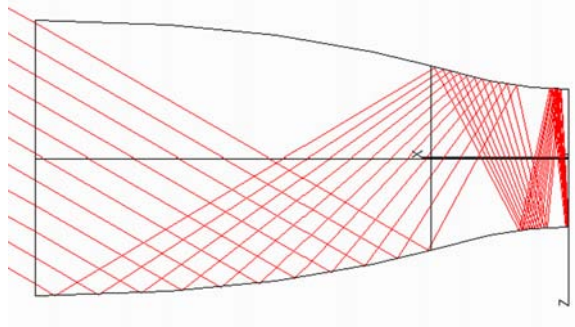


Figura 2.20: Trazado de rayos HPC, luz colimada a  $30^\circ$

En la figura 2.21 se muestran dos tipos de HPC en tres dimensiones hechos por rotación del perfil 2D con diferentes valores para la distancia focal y el mismo valor de aceptación angular así como de radio de apertura de salida.



Figura 2.21: HPC 3D, abajo  $f = 18$ , arriba  $f = 30$ ,  $\theta = 30$  y  $a' = 12$

### 2.4.2. Caracterización analítica del HPC

Este tipo de concentrador se define geoméricamente por tres parámetros, en cambio el CPC sólo necesita dos parámetros para ser definido. Los parámetros necesarios para describir un HPC son  $f$  que es la distancia focal de la hipérbola,  $\theta$  que es el ángulo de aceptación y  $a'$  que es el radio de la apertura de salida. Estos cuatro parámetros describen completamente el HPC, siendo la longitud total del sistema función de los mismos,

## 2.4 Concentrador hiperparabólico (HPC)

$$L = \left( f + \frac{a'}{\sin \theta} \right) \cot \theta. \quad (2.43)$$

El punto de unión entre la hipérbola y la parábola,  $U$ , da la longitud de la parte hiperbólica,  $x_u$  y puede ser calculado por la intersección entre la línea que pasa por el foco y la misma hipérbola,

$$x_u = \frac{(f^2 - a'^2)(f \tan \theta - a' \sec \theta)}{(f^2 \tan^2 \theta - a'^2 \sec^2 \theta)}, \quad (2.44)$$

este punto es la zona de inflexión del concentrador. La parábola tiene una distancia focal de,

$$f_p = \left( f + \frac{a'}{\sin \theta} \right) \sin \theta = f \sin \theta + a'. \quad (2.45)$$

Es posible describir el HPC mediante una función de sus parámetros diferenciando la parte hiperbólica de la parabólica,

Hiperbólica:

$$\frac{y^2}{a'^2} - \frac{c^2}{f^2 - a'^2} = 1 \quad \text{donde } 0 \leq x \leq x_u, \quad (2.46)$$

Parabólica:

$$[(y + f) \cos \theta + x \sin \theta]^2 = 4(f \sin \theta + a')[x \cos \theta - (y + f) \sin \theta + f \sin \theta + a'], \quad (2.47)$$

donde  $x_u \leq x \leq L$ .

### 2.4.3. Simulación eficiencia angular HPC

El comportamiento óptico del HPC 3D se ha simulado por ordenador mediante trazado de rayos para distintas configuraciones paramétricas. Se ha estudiado la dependencia de la eficiencia o transmitancia respecto a la distancia focal de la hipérbola para tres ángulos de aceptación distintos,  $\theta = 10$ ,  $\theta = 30$  y  $\theta = 50$ . La dependencia en el radio de la pupila de salida es básicamente un factor de escala. Para construir un HPC escalado con el mismo ángulo de aceptación e igual curva de transmitancia se ha de multiplicar por un factor de escala el parámetro  $a'$  y el parámetro  $f$ . La figura 2.22 representa las curvas de transmitancia angular para seis HPCs con un ángulo de aceptación  $\theta = 10$ , radio  $a' = 12mm$  y reflectancia  $\rho = 1$ .

Las seis curvas corresponden a distintas focales,  $f = 0$  es el caso del CPC, así como las focales 18, 30, 60, 120 y 240 mm. La simulación por ordenador se ha realizado con haces de rayos perfectamente colimados y con un número elevado de los mismos para asegurar una simulación correcta. La precisión en la medida se ha establecido en  $0.1^\circ$  para representar correctamente la caída de las curvas. Se observa que el CPC corresponde al caso particular de un HPC con focal 0, asimismo es el límite inferior de rendimiento de los HPC

## 2. Concentradores de radiación por campo de luz

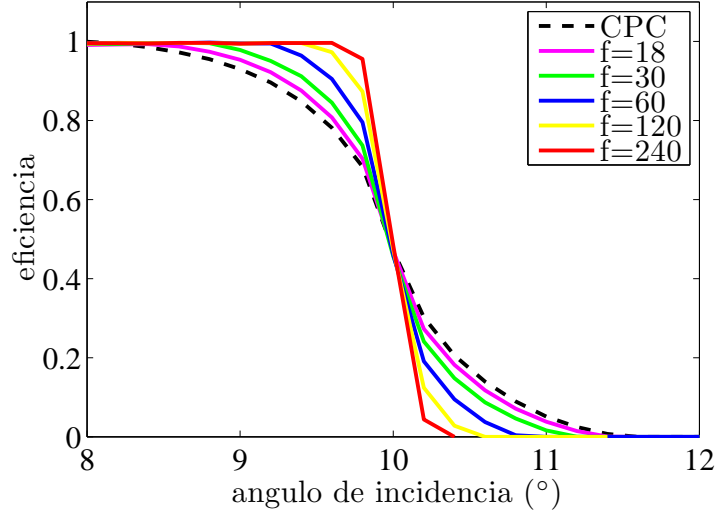


Figura 2.22: Eficiencia HPC  $\theta = 10$  para distintas focales

para condiciones de  $\rho = 1$ . El comportamiento ideal en tres dimensiones se muestra más acusado conforme nos acercamos a la mayor focal estudiada,  $f = 240\text{mm}$ . Es claro que si  $f \rightarrow \infty$  el HPC en 3D se comportará como un concentrador ideal para fuente infinita con una curva de transmisión con caída en  $\theta$ , así que se alcanzaría el límite termodinámico de concentración de acuerdo con las conclusiones de Garwin [44]. Resultados similares se obtienen

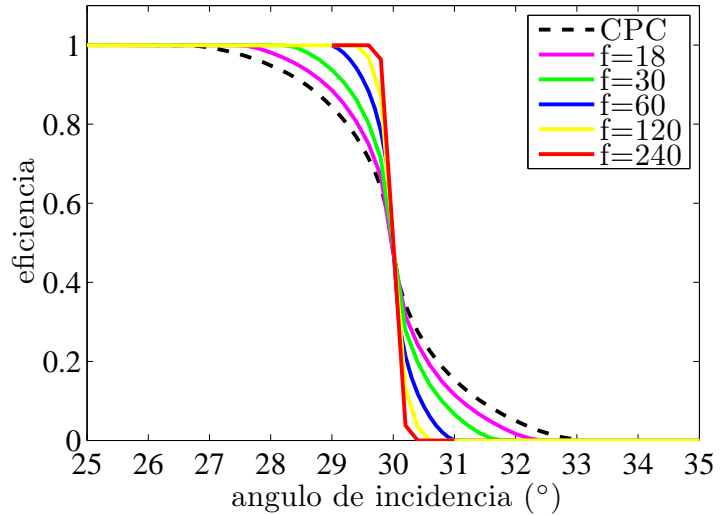


Figura 2.23: Eficiencia HPC  $\theta = 30$  para distintas focales

para las simulaciones realizadas a HPCs con ángulos de transmitancia de  $\theta =$

## 2.4 Concentrador hiperparabólico (HPC)

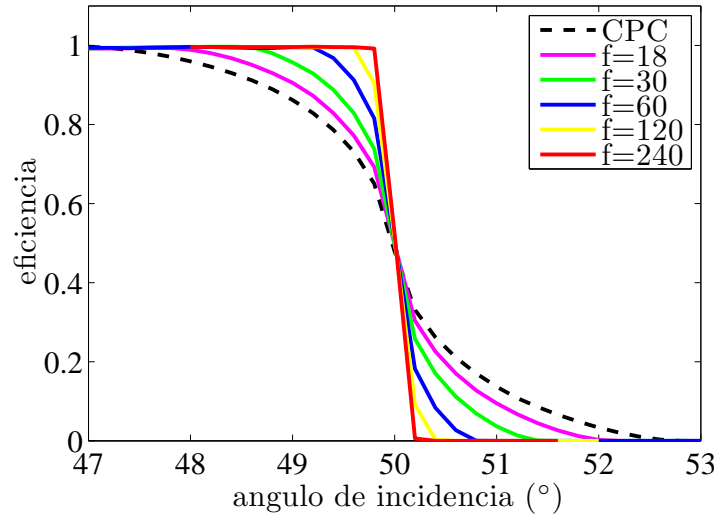


Figura 2.24: Eficiencia HPC  $\theta = 50$  para distintas focales

30 y  $\theta = 50$ , figuras 2.23 y 2.24 respectivamente. Dado el interés industrial de este nuevo dispositivo el diseño, aparte de ser publicado en una revista científica [41], ha sido patentado [42] conjuntamente por la UPM y la UCM.



## Capítulo 3

# Captadores para iluminación, iluminadores

El empleo de ópticas de concentración es aplicable a tecnologías muy diversas, en este capítulo se presentan ópticas de captación de radiación que no necesariamente van a concentrar la luz. El uso de estos sistemas es habitual en sistemas de iluminación con luz natural, actualmente se emplean también en ópticas ya sean reflectoras o refractoras para LEDs [45] debido a su capacidad de colimación con dimensiones contenidas. El funcionamiento es inverso a los sistemas de concentración donde los ángulos de salida de la luz se incrementan con el nivel concentración según étendue. En el caso de las ópticas de captación o iluminadores el funcionamiento es similar a colimar la radiación con lo que el ángulo de salida del sistema es menor que el de captación lo que necesariamente implica no tener concentración como se ha visto en capítulos anteriores.

### 3.1. Axicon óptico para optimización de arrays con integración espacial

Teóricamente un integrador espacial produce una irradiancia uniforme y definida en un plano determinado. Dentro de la teoría de arrays ópticos (agrupaciones ópticas) [46] esta zona de irradiancia concreta se denomina imagen sintética.

En este tipo de sistemas la luz entra en cada elemento individual por su abertura, esta abertura es tratada por el sistema óptico posterior, generalmente una lente, para formar la imagen sintética. El desalineamiento de cada elemento individual es calculado *ex profeso* para que las imágenes individuales coincidan formando la imagen sintética. Esta propiedad se emplea en varias aplicaciones, entre ellas el diseño arquitectónico de sistemas de iluminación natural y el campo de los sensores ópticos capaces de detectar una señal independientemente de la localización espacial.

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

---

La teoría básica de los arrays ópticos esta formulada bajo la teoría paraxial. S. Wang and L. Ronchi [46] emplearon la formulación de la óptica matricial y desarrollaron un marco sólido donde los arrays ópticos podían ser descritos. En este tratamiento los elementos individuales de un array se describen por una matriz  $abcd$  2x2. Los elementos de la matriz  $abcd$  que caracterizan un array óptico con integración espacial deben cumplir la siguiente relación:

$$R = l - \frac{b}{d}, \quad (3.1)$$

donde  $R$  es la distancia entre el plano de entrada del array y el plano donde se sitúa la imagen sintética,  $l$  es la longitud de cada unidad individual y  $b$  y  $d$  son los elementos de la matriz para cada elemento individual. Esta condición implica que el eje óptico de cada unidad individual intersecte el centro de la imagen sintética. Una configuración estándar propuesta por Wang y Ronchi localiza el vértice del sistema individual de entrada en una esfera de radio  $R$  cuyo centro es, lógicamente, el centro de la imagen sintética. En esta configuración se produce un sistema con forma de domo. A nivel práctico en empleo de sistemas ópticos integradores planos [47] es mejor debido a que la integración de un sistema tipo domo es más compleja de ejecutar arquitectónicamente. En esta configuración plana la matriz 2x2 será extendida a una matriz 4x4 que contempla el desalineamiento y descentramiento de las unidades.

#### 3.1.1. Arrays ópticos anidados con integración espacial

La eficiencia de los arrays ópticos empleados en iluminación natural [47, 48] no es tan alta como la obtenida por los sistemas de seguimiento solar activo [49]. Sin embargo la ventaja principal de un array con integración espacial es que esta prácticamente libre de mantenimiento al no tener partes móviles. Buscando una mejora en el rendimiento de este tipo de dispositivos se han estudiado ciertas mejoras en su diseño. El objetivo es mejorar el nivel de irradiancia [50] en el plano de la imagen sintética sin deteriorar la uniformidad. Para ello se ha estudiado la inclusión de elementos auxiliares en el plano de entrada del array global. El sistema propuesto comprende la combinación de dos arrays anidados, uno de ellos es el array *madre* que tiene las características del array integrador espacial y el otro es el array denominado array óptico *hijo* que se localiza en el plano de entrada del array *madre*. Su función principal es dirigir la luz hacia la superficie de salida del array *madre* y por funcionamiento al plano de la imagen sintética.

El array *madre* empleado es un array plano integrador espacial ya demostrado teórica y experimentalmente. Una de las conclusiones derivadas del análisis matricial de arrays ópticos es que la integración espacial no depende de las características del primer elemento del array. Como ejemplo un array compuesto de dos lentes formará la imagen sintética independientemente de la curvatura de la primera lente del array. Teniendo en cuenta

### 3.1 Axicon óptico para optimización de arrays con integración espacial

esta propiedad con el objetivo de incrementar la eficiencia global del sistema es posible introducir elementos localizados en el plano de entrada que no modifican la imagen sintética pero que pueden llevar más radiación a la misma con el consiguiente incremento en eficiencia.

#### 3.1.2. Diseño unidad captadora axicon

El esquema de los arrays anidados se presenta en la figura 3.1 donde se observa el empleo de ambos arrays en la configuración global. El array *hijo* esta situado en la entrada del array *madre*. El array de la entrada esta compuesto de unidades dioptrio-axicon que es la unidad básica que configura ese array.

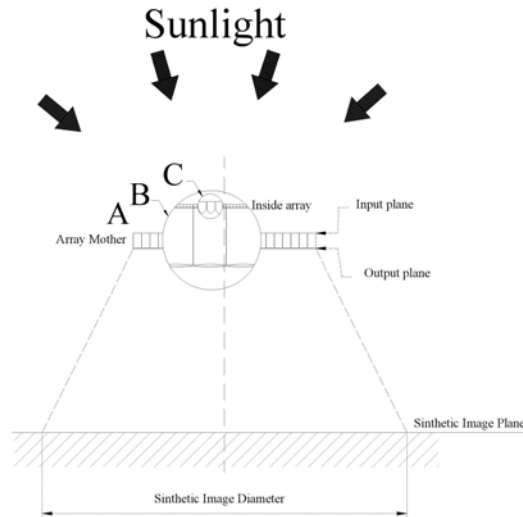


Figura 3.1: Array anidado en configuración plana, array madre (A), ampliación array madre (B) donde se observa array hijo (C)

El sistema se emplea en aplicaciones de iluminación natural, por ello debe ser diseñado para su uso en una latitud concreta. En este caso se ha elegido la latitud de Madrid como referencia ( $40.45^{\circ}\text{N}$ ) y se ha establecido un rango de funcionamiento apropiado de altura solar entre  $15^{\circ}$  y  $75^{\circ}$ . Usando estas condiciones previas se han analizado cuatro diseños de unidad básica, figura 3.2.

La unidad 1, denominada prismática, es un prisma que desvía la luz  $40^{\circ}$  en el eje transversal. El vértice del prisma se alinea en la dirección Este-Oeste. Su principal problema es que el movimiento aparente del Sol durante el día provoca una incidencia oblicua lo que provoca en determinado ángulo una reflexión total interna (TIR) con la consiguiente pérdida de flujo.

El diseño de la unidad 2, denominada axicon, trata de evitar esta TIR. La unidad tiene simetría de rotación por lo que es insensible al movimiento



### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

---

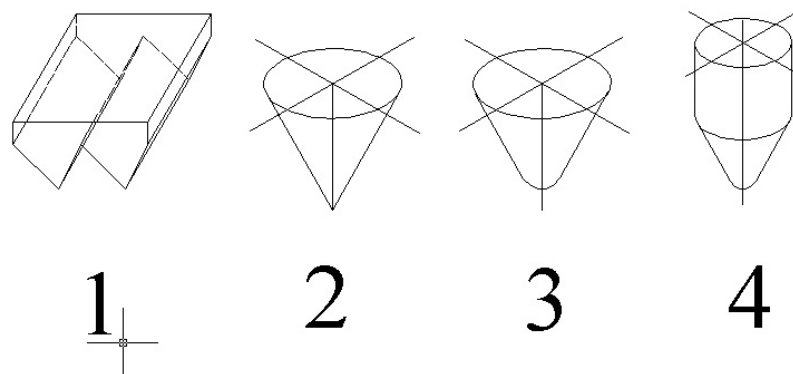


Figura 3.2: Tipos de unidades estudiadas

Este-Oeste. Sin embargo cuando la luz incide en un ángulo de altitud elevado hay mucha pérdida por TIR en los lados del axicon.

En la tercera alternativa, denominada dioptrio-axicon, el vértice del axicón es reemplazado por un dioptrio con una curvatura y extensión determinada. Esta porción esférica permite el paso de radiación proveniente de ángulos elevados que en el diseño 2 eran rechazados por reflexión total interna.

El diseño 4, denominado cilindro-dioptrio-axicon, presenta un cilindro a modo de fibra óptica añadido al plano de entrada de la unidad 3. El efecto de este cilindro es incrementar la superficie de entrada del elemento usando las paredes del mismo por medio de TIR. Es necesario un análisis detallado del funcionamiento de este sistema debido a las reflexiones producidas en las paredes del cilindro. Asimismo este diseño permite un mejor empleo práctico debido a la mejor compactación y alineamiento de las unidades.

#### 3.1.3. Prototipo experimental y simulaciones del cilindro-dioptrio-axicon

Se ha fabricado, en policarbonato, un elemento axicon del tipo 4 mediante un torno de precisión con un diámetro de 12 mm, figura 3.3. Este prototipo se ha pulimentado con diferentes pastas de diamante hasta conseguir una superficie de calidad óptica.

Para evaluar experimentalmente el el prototipo se ha montado en una mesa óptica la unidad como se muestra en la figura 3.4. La fuente de iluminación es una lámpara halógena adecuadamente colimada y dirigida hacia la pupila de entrada de la unidad. Posteriormente se dispone de una CCD fotométrica Prometric 1400 y una pantalla difusora Lambertiana en trans-

### 3.1 Axicon óptico para optimización de arrays con integración espacial

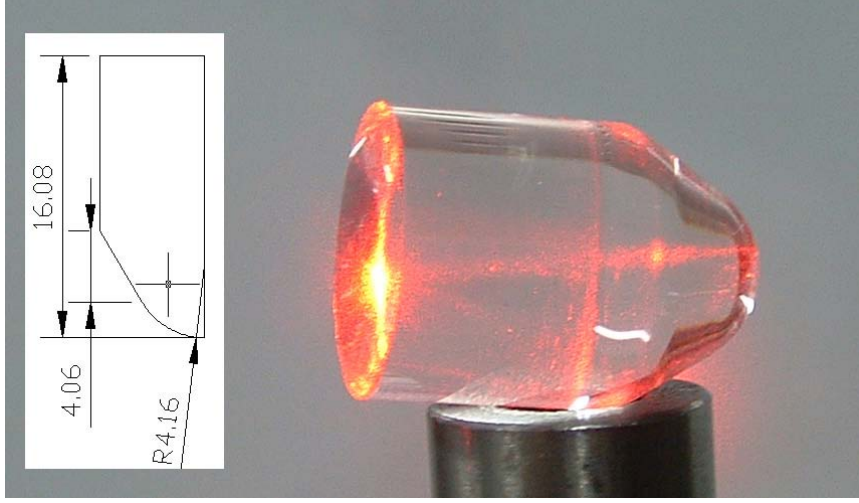


Figura 3.3: Prototipo unidad axicon

mitancia que permite registrar la salida y distribución de la luz que sale de la unidad.

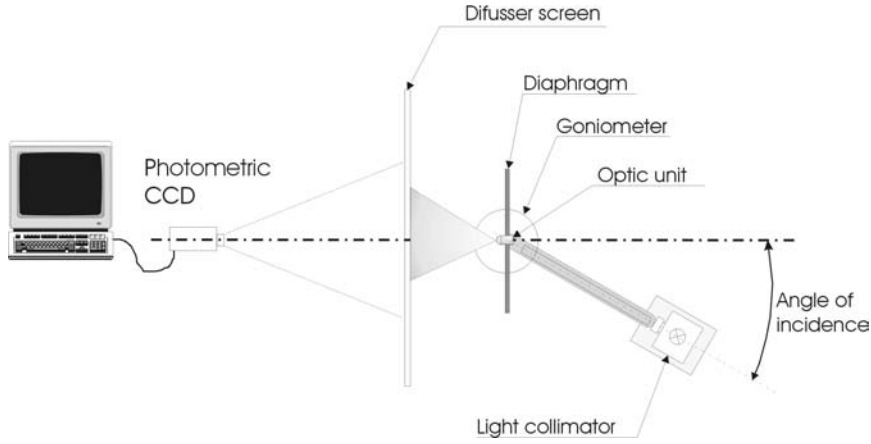


Figura 3.4: Montaje experimental prototipo unidad axicon

Para poder evaluar la eficiencia se ha medido con la CCD el flujo  $\Phi_{entrada}$  que entra en la unidad así como el flujo que sale de la unidad  $\Phi_{salida}$ , este flujo es proporcional al sumatorio de los niveles de gris dados por la CCD fotométrica con lo que la eficiencia angular será:

$$\rho(\alpha) = \frac{\Phi_{salida}}{\Phi_{entrada}}. \quad (3.2)$$

El procesamiento de los planos de irradiancia obtenidos, figura 3.5, permite obtener unos perfiles, figura 3.6, donde se visualiza de manera rápida la concordancia entre las medidas experimentales y las simuladas. Se observa claramente que en la situación experimental el ancho de la mancha de luz

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

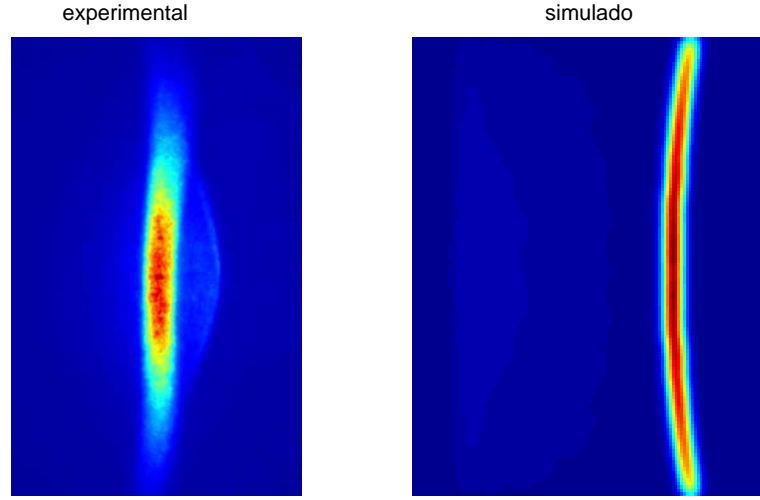


Figura 3.5: Plano iluminancia experimental y simulado incidencia solar  $40^\circ$

es mayor que la experimental, esto es debido a que la colimación del haz de luz experimental no es perfecta y por ello tiene una divergencia que no aparece en el haz de luz simulado que esta perfectamente colimado ya que la aplicación de trazado de rayos así lo permite.

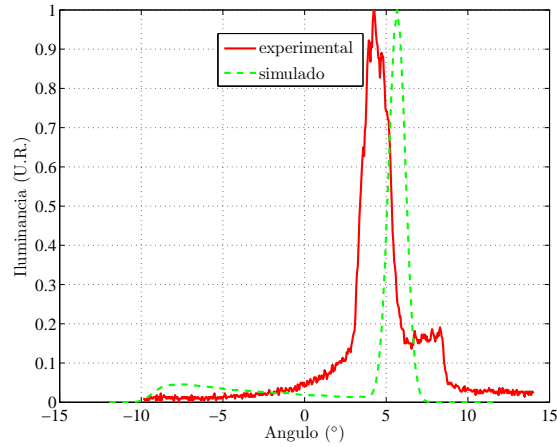


Figura 3.6: Perfil iluminancia experimental y simulado incidencia solar  $40^\circ$

En la figura 3.7 se muestra el rendimiento medido de manera experimental comparado con el rendimiento simulado mediante trazado de rayos. Se observa una buena concordancia entre ambas medidas y una estabilidad en la eficiencia de 0 a  $60^\circ$  de altura solar. Al ser una unidad de revolución el comportamiento no varía respecto a la variación angular en acimut.

Una ventaja importante del cilindro-dioptrio-axixon es que combina la

### 3.1 Axicon óptico para optimización de arrays con integración espacial

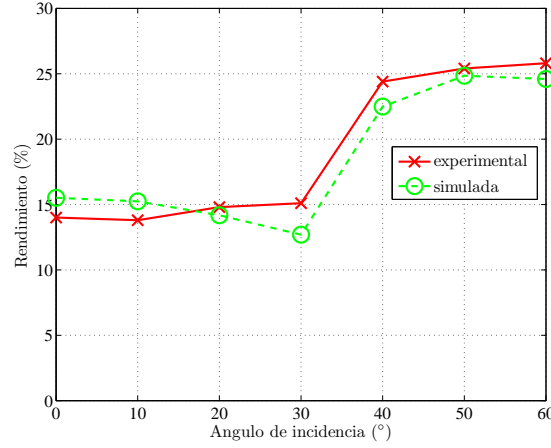


Figura 3.7: Comparativa eficiencia experimental y simulada

contribución de tres elementos ópticos como son el axicon, el cilindro y la zona esférica. Esta contribución se va a medir experimentalmente para detallar la contribución individual de cada elemento. Como se muestra en la

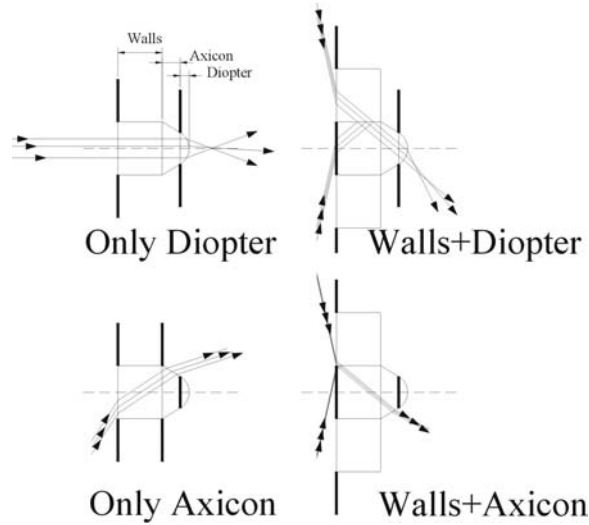


Figura 3.8: Esquema gráfico de aperturas y contribuciones de cada elemento

figura 3.8, mediante el empleo de diafragmas, es posible evaluar la radiación con la que contribuye cada zona. Se ha calculado cada zona del elemento óptico para que cuando uno de ellos pierda rendimiento debido a la incidencia angular el otro coja el relevo y aumente su eficiencia con lo que la eficiencia global del sistema se mantiene estable. Se observa un desplazamiento angular en las curvas que concuerda parcialmente con el observado en los planos de iluminancia simulados y experimental. No se ha investigado esta desviación pero puede provenir de desajustes o

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

desalineamientos en la fabricación del prototipo como una cara de entrada que no sea perpendicular al eje óptico lo que podría producir un efecto prismático en la imagen obtenida.

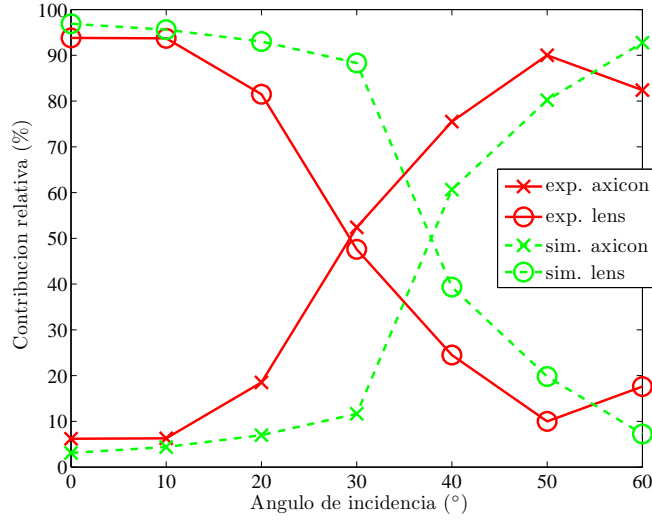


Figura 3.9: Contribución relativa experimental (rojo) y simulada (verde) para zona axicon y dioptrio

#### 3.1.4. Resultados

Para comprender las ventajas de la inclusión de una matriz de cilindro-dioptrio-axicon en la superficie de entrada de los elementos individuales de un integrador espacial se han calculado las eficiencias de la radiación que llega a la imagen sintética para varias situaciones comunes y fáciles de implementar en la arquitectura actual.

Una de las opciones es dejar sin elemento óptico la apertura de entrada de las unidades individuales del array *madre*, opción apertura sola. La segunda opción es colocar una pantalla difusora en la apertura de entrada. Estas dos opciones elementales se comparan con el la unidad óptica diseñada, los resultados se muestran en la tabla 3.1.

A modo de resumen se van a procesar los datos de la tabla 3.1 dentro del rango de elevación solar de  $30^{\circ}$  a  $60^{\circ}$  que corresponden con la elevación solar del día de mayor irradiancia en Madrid. Se obtiene una media de eficiencia para la apertura sola del  $14.18\% \pm 19.44$ , para la pantalla difusora de  $5.5\% \pm 0$  y para el elemento propuesto se obtienen unos valores de  $21.15\% \pm 5.74$ . Ante todo se evidencia que el elemento propuesto mantiene una desviación estándar muy baja respecto a los otros sistemas, esto indica una estabilidad muy buena en la captación de radiación. También se observa que la eficiencia se mantiene más alta que en los otros sistemas.

### 3.2 Captador para luz natural aplicado a señalización vial vertical

Ángulo de incidencia ( $^{\circ}$ )	Eficiencia (%)		
	Apertura sola	Pantalla difusora	Unidad AXICON
0	100	5.5	15.5
10	80.8	5.5	15.2
20	62.6	5.5	14.2
30	41.2	5.5	12.7
40	15.5	5.5	22.5
50	0	5.5	24.9
60	0	5.5	24.6

Tabla 3.1: Eficiencia en la transferencia de energía desde el plano de entrada de un integrador espacial hasta la imagen sintética del mismo. Resultados obtenidos por simulación de trazado de rayos con luz colimada

### 3.2. Captador para luz natural aplicado a señalización vial vertical

La aplicación de nuevas tecnologías a los paneles de señalización vial vertical no ha resuelto el problema de deslumbramiento que se presenta cuando el Sol incide en la parte trasera del panel y hace que el panel sea ilegible. Esta situación ocurre principalmente cuando la carretera esta orientada en dirección este-oeste. Dependiendo del sentido de la marcha el problema aparece en el amanecer o el atardecer.

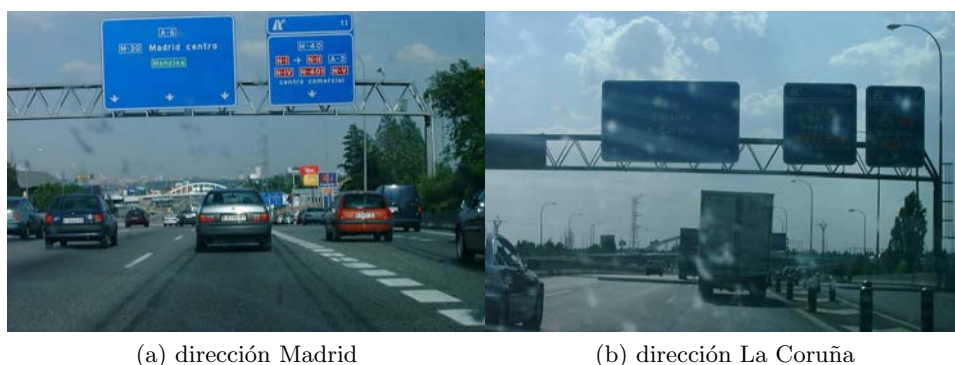


Figura 3.10: Panel señalización vertical situado en A-6

En la figura 3.10 se observa para la misma carretera a la misma hora como en un sentido de circulación no hay pérdida de visibilidad en el panel pero en cambio en el otro sentido la pérdida de visibilidad es total. Para solucionar el problema las nuevas tecnologías como LEDs, viseras y retrorreflectores [51, 52] no son capaces de mejorar lo suficiente la visibilidad de estos paneles. Para ello se va a diseñar una unidad que funciona por óptica anidólica [53, 54]

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

---

y que se basa en el principio de acción y reacción. La luz natural es la que provoca problemas de visibilidad y dado que una fuente de luz artificial nunca va a poder -con un consumo razonable- proporcionar la luminancia necesaria para contrarrestar el efecto producido por el Sol, se va a emplear la radiación solar cuyo nivel de irradiancia se incrementa al aumentar el deslumbramiento.

#### 3.2.1. Unidad óptica anidólica de captación

La idea básica es captar la luz natural por la parte trasera del panel y distribuirla por la parte delantera con el objetivo de crear puntos de luz conformados matricialmente con los que conseguir los caracteres o símbolos necesarios para la correcta visibilidad del panel.

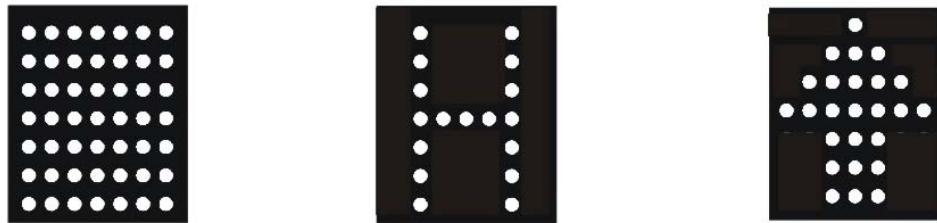


Figura 3.11: Matriz de puntos conformando caracteres o símbolos

Para conseguir esta matriz de puntos hay varios sistemas que se han evaluado como son:

- abertura circular
- guía de luz cilíndrica
- sistema anidólico de captación y redirección

El primer sistema es bastante simple en su concepción pero sólo funciona en condiciones angulares muy concretas dado que la luz que sale por su abertura de salida depende directamente del ángulo de incidencia de la luz natural. En el caso del la guía cilíndrica el comportamiento es similar sólo que la luz captada es emitida en un anillo de luz con un ángulo dependiente de la incidencia de la luz solar. Dada la naturaleza de la luz natural que implica un movimiento aparente constante del Sol y con ello una variación en el ángulo de incidencia se hace necesario el diseño de una unidad óptica que permita una captación de la radiación con independencia de este movimiento. El diseño de la unidad óptica consiste en dos CPCs unidos como se muestra en la figura 3.12, el CPC de entrada está diseñado con semi-ángulo de captación de  $30^\circ$  y el CPC de salida con un semi-ángulo de salida de  $20^\circ$ . La unidad óptica está inclinada  $10^\circ$  sobre la horizontal por lo que según la teoría de funcionamiento debe rechazar la luz que llega por encima de  $40^\circ$ .

### 3.2 Captador para luz natural aplicado a señalización vial vertical

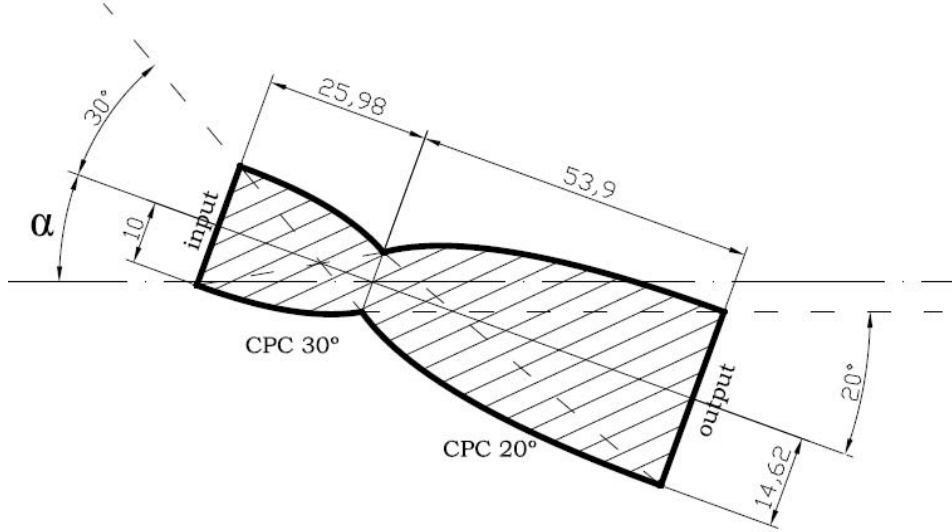


Figura 3.12: Unidad óptica antideslumbramiento

La zona de entrada de la unidad concentra la radiación solar en la unión con un ángulo sólido de salida en la unión de  $2\pi$  radianes. La zona de salida trabaja en modo inverso y en vez de concentrar la luz la colima dentro del semiángulo de diseño. Este tipo de unidad puede ser fabricado tanto en material dieléctrico como con superficies especulares aunque lógicamente esto variará, según la ley de Snell, los ángulos de trabajo del sistema. Para simular la unidad se va a hacer un trazado de rayos simulando una carretera de tres carriles. La carretera mide 9 m x 50 m y la unidad óptica se sitúa a 6 m de altura centrada en la carretera. EL trazado de rayos se hace de  $0^\circ$  a  $50^\circ$  de altitud solar para posteriormente evaluar la eficiencia y la distribución de radiación sobre la superficie de la carretera.

En la figura 3.13 se observa un trazado de rayos de la unidad dispuesta en el plano vertical (x-y) que proyecta la luz sobre el plano horizontal (x-z) de la carretera con una incidencia solar a  $0^\circ$  de elevación sobre la horizontal. La superficie de salida de la unidad tiene un tratamiento difusor para distribuir la radiación uniformemente sobre la calzada, en este caso se ha simulado con una función BTDF de 0.89,  $A=0.1181$ ,  $B=0.1$  y  $g=2$ . La función empleada tiene una reflexión especular de 0.1 y una transmisión especular de 0.01. La superficie de la unidad esta simulada con un espejo perfecto y la eficiencia se va a calcular como:

$$\eta = \frac{\phi_{carretera}}{\phi_{entradaunidad}}, \quad (3.3)$$

donde  $\phi$  es el flujo que llega a cada zona. En la figura 3.14 se observa la eficiencia simulada así como el corte que teóricamente debería aparecer en la cota de los  $40^\circ$ , ángulo para el cual se estima que la unidad no es necesaria.



### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

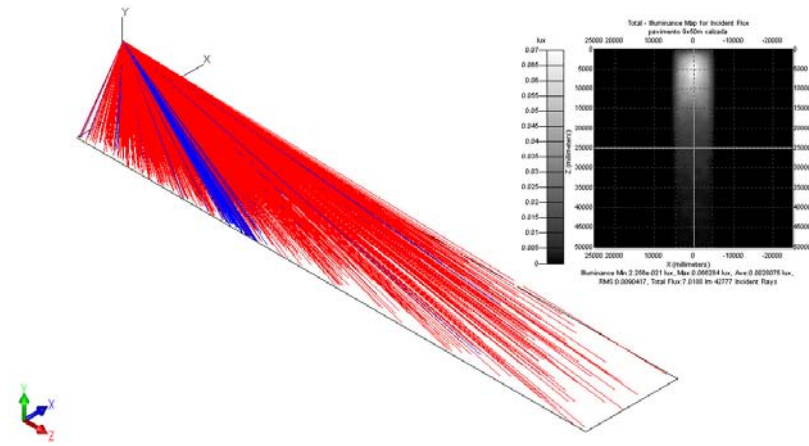


Figura 3.13: Trazado de rayos y mapa de iluminancia, unidad óptica altura solar  $0^\circ$

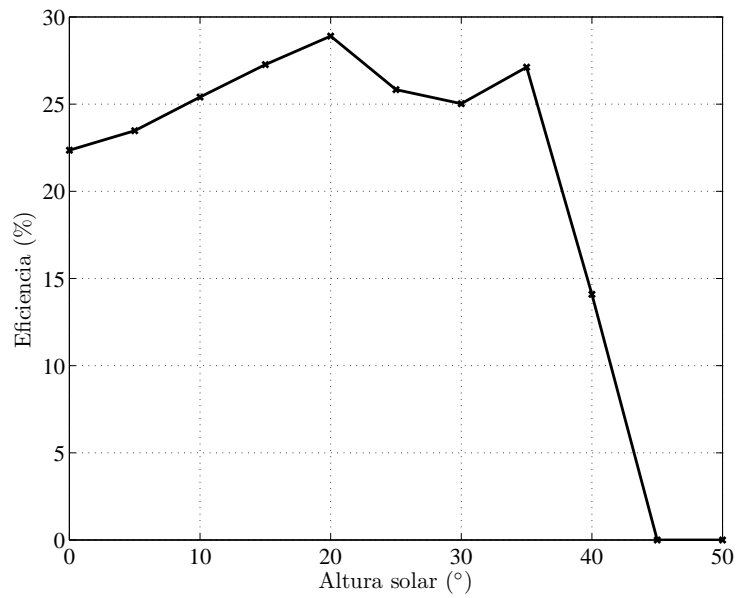


Figura 3.14: Eficiencia unidad sobre la calzada

### 3.2 Captador para luz natural aplicado a señalización vial vertical

Esta simulación esta calculada para una orientación norte-sur de la carretera, la unidad colocada en el sur y el acimut solar es  $0^\circ$ . Debido a la uniformidad en la salida de la luz para acimuts distintos a  $0^\circ$  el comportamiento es similar con poca pérdida de eficiencia global del sistema.

La cantidad de luz que el ojo humano detecta es luminancia, para ello mediante los planos de iluminancia en la carretera se calcula la intensidad con la ley inversa del cuadrado de la distancia:

$$E = \frac{I \cos(\beta)}{d^2}, \quad (3.4)$$

conociendo el área de la superficie de salida el cálculo de la luminancia es inmediato. Para ello es necesario estimar el flujo que llega del Sol a la unidad. Hay varias recomendaciones y medidas para distintas localidades. Un método conocido es estimar la iluminancia que el Sol produce en una superficie horizontal [55, 56]:

$$E_{dn} = E_{sc} \left( 1 + 0.034 \cos \left( \frac{2\pi(J-2)}{365} \right) \right) \exp^{\frac{-c}{\sin(h)}}, \quad (3.5)$$

donde  $E_{dn}$  es la iluminancia normal directa,  $E_{sc}$  es la iluminancia solar extraterrestre con un valor de 127.5 Klux [56],  $J$  es el día,  $c$  es el coeficiente óptico de extinción atmosférica que es 0.21 y  $h$  es la elevación solar.

$$E_{dh} = E_{dn} \sin(h), \quad (3.6)$$

donde  $E_{dh}$  es la iluminancia horizontal solar directa. Como la pupila de entrada de la unidad esta inclinada respecto a la horizontal es necesario saber la iluminancia en una superficie inclinada,

$$E_{tilt} = E_{dn} \cos \left( h + \beta - \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.7)$$

donde  $E_{tilt}$  es la iluminancia para una superficie inclinada y  $\beta$  es el ángulo de inclinación de la superficie desde la horizontal. Empleando la ecuación 3.7 es posible estimar la iluminancia en la superficie de entrada de la unidad para calcular el flujo captado y tenerlo en cuenta en el trazado de rayos, figura 3.15.

Se ha simulado teóricamente la unidad diseñada y esta funcionaría correctamente en todo el rango de incidencia solar. Los perfiles centrales de luminancia desde la carretera, figura 3.16, muestran una buena estabilidad independientemente del movimiento solar.

Con el objetivo de sopesar la viabilidad del panel en condiciones reales se ha fabricado un prototipo experimental básico con guías de luz cilíndricas, en este prototipo se ha dispuesto una matriz de 7x5 guías de luz. En la parte trasera de la matriz se deja un sitio para poner una máscara que permite conformar el símbolo o carácter requerido. En este caso se ha empleado una máscara de la letra “E”. Como se muestra en la figura 3.17 si el panel se observa cuando el Sol le da por la parte delantera del mismo la leyenda

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

---

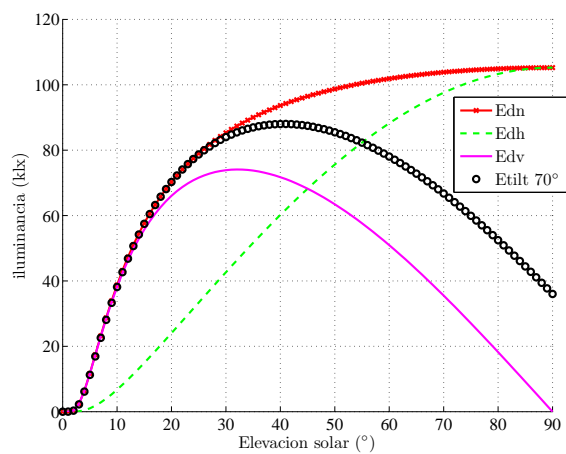


Figura 3.15: Iluminancia para superficie de entrada de la unidad óptica, inclinada  $70^\circ$  ( $E_{tilt\ 70^\circ}$ )

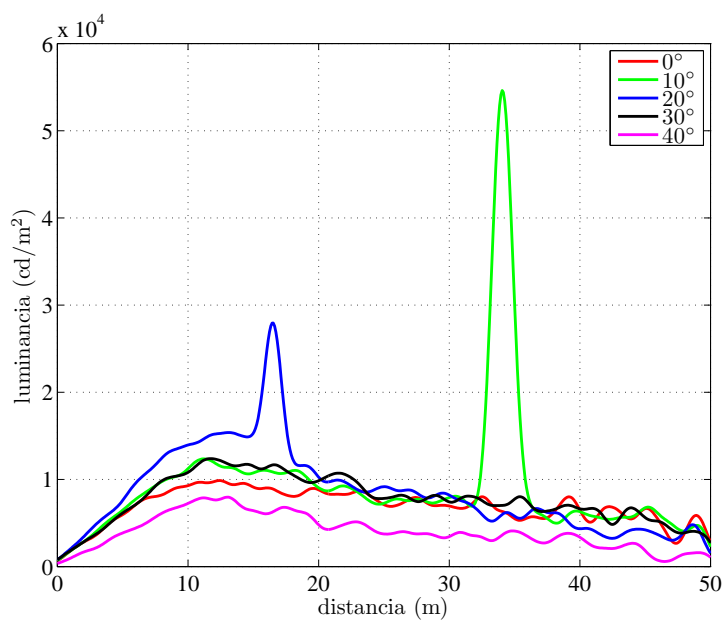


Figura 3.16: Luminancia producida por la salida de la unidad vista desde la calzada

### 3.3 CPC prismático como lucernario

original es observada claramente. En el caso de que la luz solar incida sobre la parte trasera del mismo la leyenda original no es legible, en cambio las unidades que conforman los píxeles de luz correspondientes a la letra “E” son totalmente visibles. Al ser un prototipo básico y estar construido con guías cilíndricas sólo funciona correctamente en ciertos ángulos de incidencia solar.

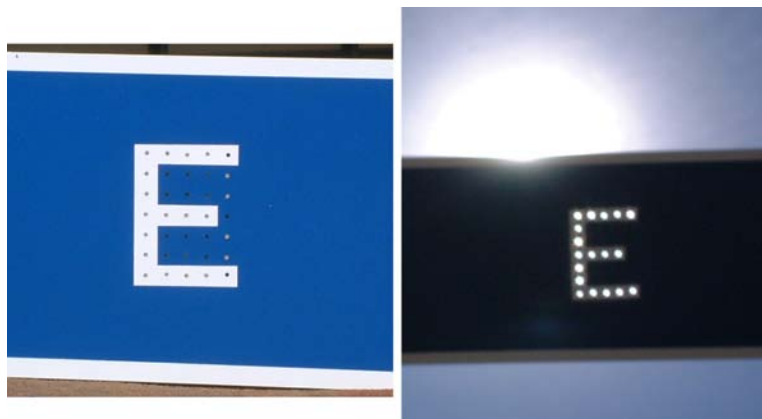


Figura 3.17: Prototipo panel con guías cilíndricas

### 3.3. CPC prismático como lucernario

En los tiempos actuales donde la racionalización del gasto en energía es un imperativo en la edificación moderna el empleo de lucernarios no ha seguido una investigación acorde con los tiempos. La mayoría de los lucernarios son aberturas en el techo con un difusor o similar pero carentes de toda óptica. Los sistemas de iluminación natural donde se usan ópticas diseñadas a partir de un CPC [57, 58] ofrecen importantes ventajas. Es interesante conocer el trabajo de un CPC trabajando en modo inverso ya que capta la radiación solar en un ángulo de  $2\pi$  colimándola dentro de los parámetros de diseño de forma pasiva ya que no necesita seguimiento solar para hacerlo con eficiencia. La gran desventaja de un CPC trabajando en modo inverso es que el área de entrada es pequeña comparada con el área de salida lo que limita en gran medida la captación de flujo por el sistema. Por ello el empleo de CPCs que aún trabajando en modo inverso empleen toda su área para la captación de flujo con superficies prismáticas [59] mejora radicalmente la posibilidad de uso para lucernarios de este tipo de ópticas, además se mantiene controlado en cierta medida los ángulos de salida con lo que el control del deslumbramiento es posible. En este sentido el desarrollo de algún tipo de elemento que pudiera trabajar como un CPC en la mayor parte del las posiciones pero que a la vez permitiera la captación de flujo de luz por toda su superficie supondría una importante ventaja ya que aunaría las ventajas de los lucernarios con difusores pero también tendría la de los que disponen

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

de geometrías especulares tipo CPC. La propiedad de trabajar como un espejo pero a la vez permitir el paso de luz difusa puede ser obtenida mediante el empleo de geometrías prismáticas como la propuesta las cuales han sido validadas para diversas aplicaciones, en su mayoría para guiado de radiación ya sea solar o artificial.

#### 3.3.1. Superficie prismática

Las láminas prismáticas fueron estudiadas por Whitehead [60] y actualmente varias compañías fabrican con prismas de  $90^\circ$ , entre otros, con micro-estructura y con calidad óptica suficiente para aplicaciones de luz natural. Estas láminas están compuestas de prismas de  $90^\circ$  con eje longitudinal que permiten una TIR<sup>1</sup> de la luz en una dirección y con ciertas condiciones. Asimismo permiten una refracción de la luz en la otra dirección como se puede apreciar en la figura 3.18. Se observa como la luz entra por el vértice de un prisma, sufre diversas refracciones, y se divide en dos brazos principales. En la figura b) se observa la refracción total interna donde la luz sale con el mismo ángulo con el que entra para un caso ideal.

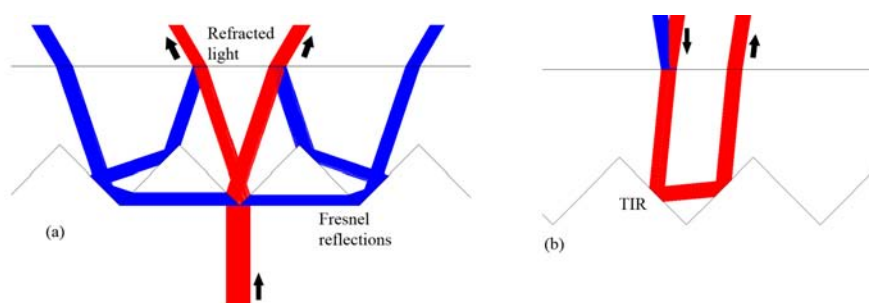


Figura 3.18: Lámina prismática, a) refracción, b) TIR en azul reflexiones de Fresnel, en rojo radiación principal

#### 3.3.2. Simulación y prototipo experimental

Para evaluar el comportamiento se ha simulado la eficiencia respecto al ángulo de incidencia. Un CPC hueco prismático en 3D (HPCPC<sup>2</sup>) se ha simulado mediante trazado de rayos. Para poder comparar con el mismo, un CPC de aluminio se ha simulado de igual modo.

Para esta simulación se han tenido en consideración dos zonas diferentes de entrada de la luz, zona 1 y zona 2. Como se aprecia en la figura 3.19 la zona 1 corresponde a la pupila de entrada de un CPC estándar trabajando en modo inverso. La zona 2 corresponde al resto de la superficie formada por la lámina prismática, zona que en el caso de un CPC estándar no podría

<sup>1</sup>Reflexión total interna (Total Internal Reflection)

<sup>2</sup>CPC prismático hueco (Hollow Prismatic CPC)

### 3.3 CPC prismático como lucernario

---

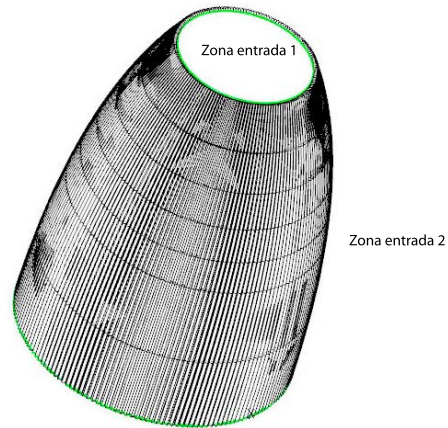


Figura 3.19: Zonas entrada luz en HPCPC 30°

captar luz ya que esta formada de material opaco. Se va a simular el flujo que entra por cada superficie comparado con un CPC que trabaje por reflexión. La precisión angular se ha establecido en pasos de 5° y se va a simular de 0 a 85° de incidencia con luz colimada. En este caso no se hace estudio de luz difusa aunque el estudio de la incidencia de luz colimada dará información cuantificable del comportamiento de la luz difusa.

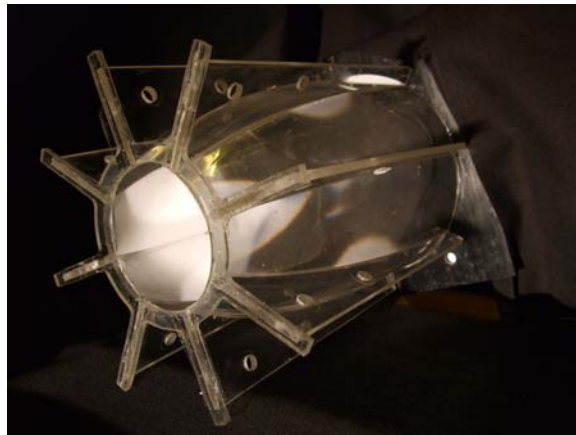


Figura 3.20: Prototipo HPCPC 30°

Se ha fabricado un prototipo conceptual de lucernario ya que la fabricación de un prototipo real implicaría el desarrollo de costosos moldes que permitiesen la validación del concepto desde el punto de vista arquitectónico ya que desde el punto de vista óptico es suficientemente preciso. El prototipo, figura 3.20, se ha construido en un formato tipo cuaderna de barco, consta de unas costillas longitudinales de policarbonato cortadas con una fresadora

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

de control numérico para asegurar la curvatura de las piezas. Estas costillas están soportadas por dos tapas de cierre que hacen de pupila de entrada y pupila de salida del sistema. Sobre estas costillas se pegan trozos de lámina OLF de la empresa 3M de forma que estas láminas adopten la curvatura de un CPC, en este caso se trata de un diseño para  $30^\circ$  de semiángulo. En esta misma fotografía se puede apreciar como las superficies interiores del CPC presentan una luminancia muy alta debido a que están reflejando la luz proveniente de una fuente situada en el eje del CPC ya que están trabajando como superficies especulares para esa dirección, no obstante también se aprecia que se puede ver a su través de las mismas, y por tanto dejaría pasar la luz difusa a través de sus paredes.

La medida de distribución de flujo se hace con un vídeo luminancímetro Prometric 1400 de la casa Radiant Imaging midiendo en una pantalla Lambertiana con dos configuraciones experimentales variando el ángulo de incidencia de  $0$  a  $75^\circ$  en pasos de  $15^\circ$ . En la figura 3.21 se observa un esquema del montaje experimental donde se ven la configuración a) que es donde se va a evaluar experimentalmente la zona de entrada 1 y la configuración b) donde se evaluará la zona de entrada 1+2.

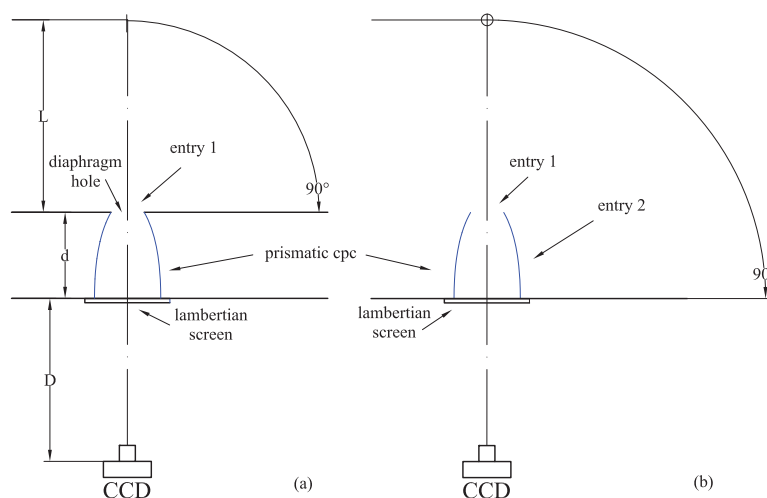


Figura 3.21: Esquema montaje experimental prototipo HPCPC  $30^\circ$

Como sistema de proyección se emplea un cañón de luz halógena de los empleados en iluminación espectacular que garantiza una colimación de la luz incidente de  $\pm 2^\circ$ .

#### 3.3.3. Resultados. Simulación CPC HPCPC salida luz

Mediante el empleo de un diagrama polar de intensidad se va a comparar gráficamente la salida de la luz de un CPC de aluminio y uno prismático para distintos ángulos de incidencia.

En la figura 3.22 se muestra la simulación de la salida de luz para ambos tipos de CPC, en el caso del HPCPC la luz esta entrando por la zona 1+2.

### 3.3 CPC prismático como lucernario

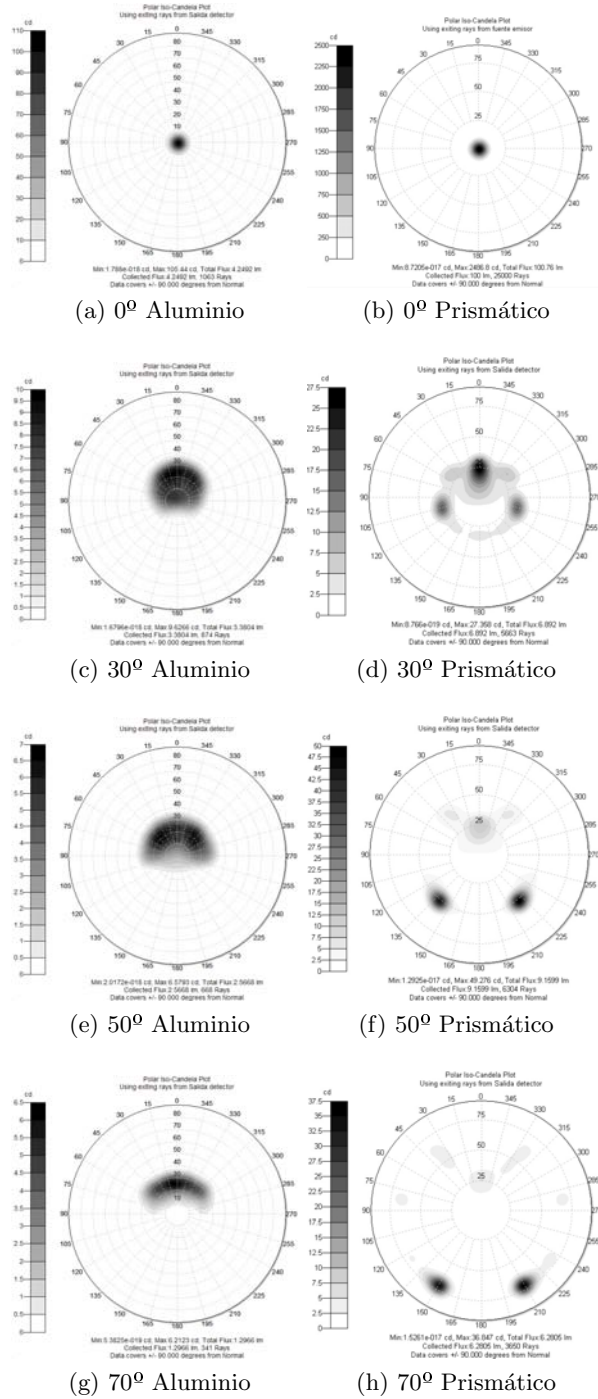


Figura 3.22: Salida luz simulada CPC y HPCPC para diversos ángulos de incidencia



### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

En un CPC de aluminio los ángulos de salida no pueden ser más grandes que los de diseño trabajando en modo inverso, esto se cumple para este caso ya que a ángulos de incidencia elevados como  $50^\circ$  y  $70^\circ$  el cono de luz de salida esta en un semiángulo menor correspondiente a  $30^\circ$ . Esto no sucede para el HPCPC ya que su diseño permite aperturas angulares mayores aunque controladas.

La eficiencia del sistema se puede calcular con los datos de flujo de las simulaciones realizadas, para ello:

$$\eta = \frac{\phi_{zona1}}{\phi_{pupiladesalida}} \quad (3.8)$$

El HPCPC acepta luz por la zona de entrada 1 y por la zona de entrada 2, esto hace que la eficiencia pueda ser mayor del 100 %.

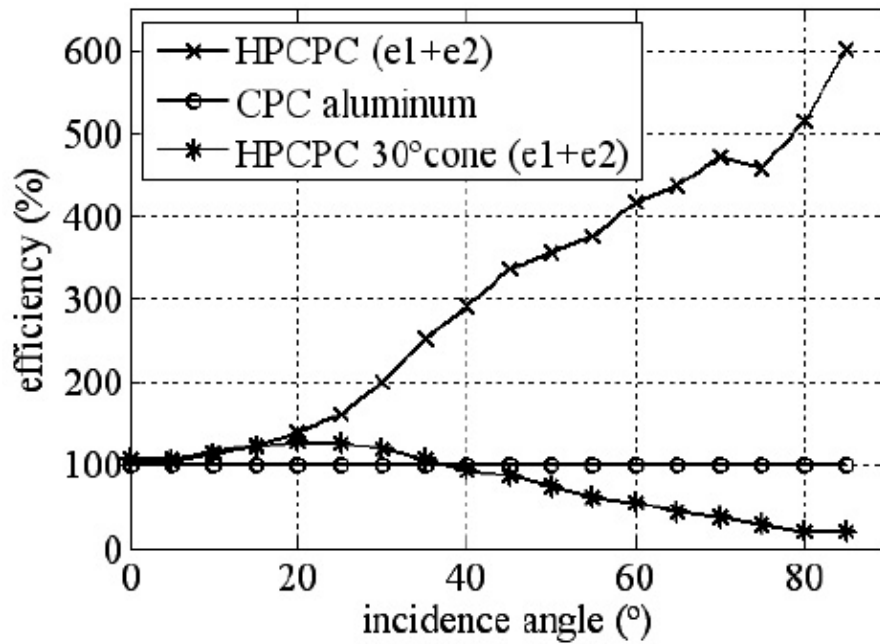


Figura 3.23: Eficiencia HPCPC vs CPC, x CPC prismático, o CPC aluminio, \* CPC prismático flujo en cono 30 grados

Cuando se calcula la eficiencia del sistema se hace un procesamiento para evaluar la eficiencia del HPCPC en un cono de  $30^\circ$  de semiángulo para conocer la eficacia en la redirección de la luz comparada con un CPC de aluminio donde toda la luz que sale lo hace en ese cono de  $30^\circ$ . En la figura 3.23 se observa que para un rango de 0 a  $40^\circ$  el funcionamiento del HPCPC (línea \*) contando esta zona de salida de luz es mejor aunque luego cae. Esto indica que el funcionamiento hasta ese ángulo es mejor que el CPC de aluminio y que la luz está controlada dentro de ese ángulo de salida.

### 3.3 CPC prismático como lucernario

Teniendo en cuenta todo el flujo que sale del HPCPC la mejora (línea x) llega a alcanzar el 600 % para un ángulo de incidencia de  $85^\circ$  comparado con un CPC de aluminio (línea o). Esta radiación es luz que no esta dentro de los  $30^\circ$  de salida respecto al eje óptico pero es luz que es efectiva en cuanto a la tarea de iluminación, si bien al tener un ángulo mayor podría provocar algún deslumbramiento molesto que en un prototipo mejorado se debe investigar.

#### 3.3.4. Resultados. Experimental vs Simulación pupila de salida

Se ha medido experimentalmente el plano de irradiancia en la pupila de salida del prototipo experimental. Este plano de irradiancia se va a comparar con el plano de irradiancia obtenido mediante simulación. La concordancia de estas medidas dependerá de la precisión experimental y de fabricación del prototipo ya que al estar fabricado en 8 cuadernas no es un objeto de revolución puro como lo es el diseño 3D simulado.

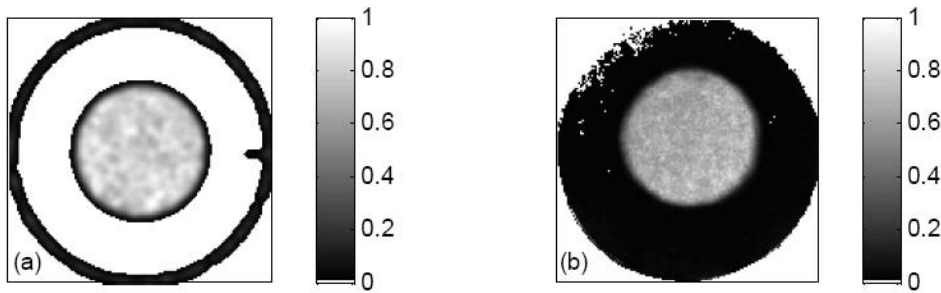


Figura 3.24: Irradiancia en pupila de salida, incidencia  $0^\circ$ , a) simulado b) experimental

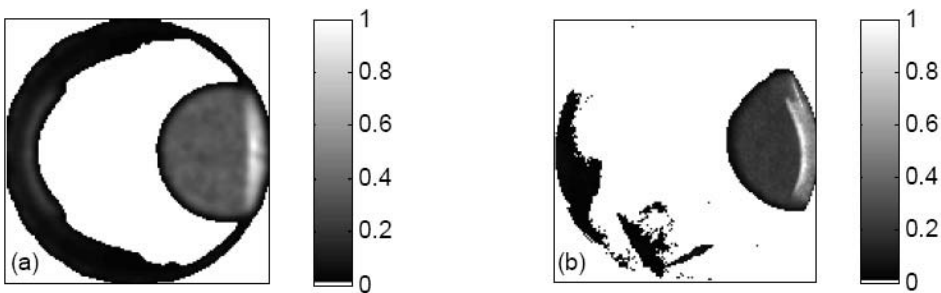


Figura 3.25: Irradiancia en pupila de salida, incidencia  $15^\circ$ , a) simulado b) experimental

Cuando tenemos un ángulo de incidencia elevado, en este caso  $60^\circ$ , como el de la figura 3.26 se observa que aparece el efecto prismático debido a la refracción. En todos los casos se observa una gran similitud entre las medidas

### 3. Captadores para iluminación, iluminadores

---

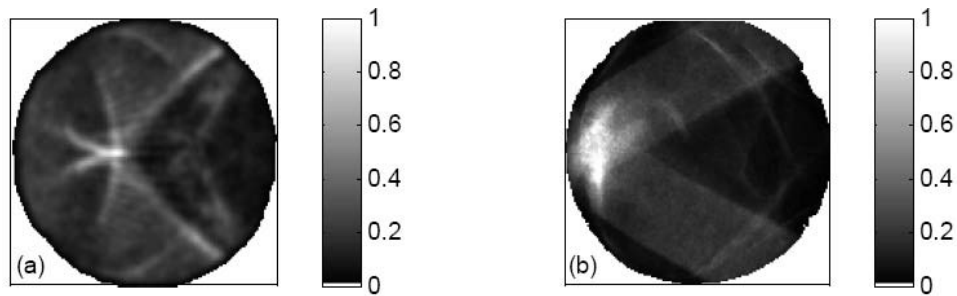


Figura 3.26: Irradiancia en pupila de salida, incidencia  $60^\circ$ , a) simulado b) experimental

experimentales y las simuladas. Como ya se ha comentado las pequeñas diferencias pueden ser debidas:

- desalineamiento experimental
- luz experimental no perfecta en su colimación
- fabricación prototipo experimental en 8 cuadernas, no es de revolución perfecta
- trazado de rayos: 555 nm de longitud de onda, experimental: luz colimada halógena

A modo de resumen el lucernario propuesto mejora sustancialmente la eficiencia de un CPC especular trabajando en modo inverso para condiciones de captación de luz natural. Asimismo se observa un gran aumento del flujo captado por el empleo de una superficie mayor de entrada. El uso de este sistema puede ser empleado en el diseño de lucernarios de gran tamaño debido a la ligereza del mismo por estar fabricado en láminas prismáticas con poco espesor. Se han obtenido eficiencias un 600 % mayores comparadas con un CPC de aluminio a  $85^\circ$  de incidencia de la luz, si bien un valor medio del 300 % es obtenido para el rango de incidencias solares de  $0^\circ$  a  $85^\circ$ .

## Capítulo 4

# Iluminación con luz natural con captador anidólico

El diseño de la iluminación para edificaciones de oficinas con luz artificial es relativamente sencillo, la normativa y recomendaciones [61, 62, 63] indican los parámetros de diseño a emplear para las distintas tipologías de trabajo. En cambio el diseño de la iluminación con luz natural es complejo, la variación temporal y espacial de la radiación solar en posición, en intensidad y en distribución espectral contribuye a la introducción de factores que complican el diseño de este tipo de sistemas. Debido a estos cambios la iluminación con luz natural debe concebirse y tratarse de forma diferente a la iluminación artificial. La luz natural se puede considerar desde un aspecto cualitativo y un aspecto cuantitativo. En la arquitectura moderna se ha querido conseguir un nivel uniforme de iluminación interior lo cual reduce el aspecto cualitativo de la luz natural a su mínima expresión. Ejemplos no faltan de arquitectura que ha obviado los beneficios de la luz natural como centros comerciales, museos, etc. mostrándose como contenedores cerrados completamente e iluminados con luz artificial exclusivamente. Afortunadamente esta tendencia está cambiando y la luz natural está siendo considerada en las nuevas edificaciones como un elemento importante que se integra en la arquitectura y que permite beneficios [64] a nivel humano y beneficios a nivel empresarial con aumentos de productividad y con ahorro en iluminación artificial y en calefacción. Aspectos como la carga térmica se usan en beneficio y se elimina su daño en ciertas condiciones.

En este capítulo se presenta un sistema de iluminación con luz natural [65, 66] basado en energía solar pasiva y diseñado para captación de radiación solar directa. Consta de un captador anidólico patentado [57] diseñado para mantener una buena eficiencia independientemente del movimiento del Sol. Después del captador el sistema está provisto de una guía hueca de aluminio donde se disponen luminarias solares para dirigir la luz en condiciones adecuadas al plano de trabajo. Se completa el sistema con ciertos materiales que permitirán uniformizar la radiación de forma que su distri-

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

bución sea correcta maximizando la eficiencia total del sistema. El trabajo que aquí se recoge se ha realizado dentro del proyecto Eureka 3575 llamado: “Active Daylighting System” (ADASY<sup>©</sup>) liderado por Lledó Iluminación S.A. y del que han formado parte Bartenbach Lichtlabor (BLL), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

### 4.1. Esquema de diseño

Se propone el diseño de un sistema anidólico de iluminación con luz natural, figura 4.1, dimensionado para que ilumine un área de  $50\text{ m}^2$  con una iluminancia adecuada a un entorno de oficinas. Como premisa de partida el sistema deberá estar integrado en una de las fachadas del edificio, preferentemente la fachada Sur debido al mayor aporte de radiación solar.

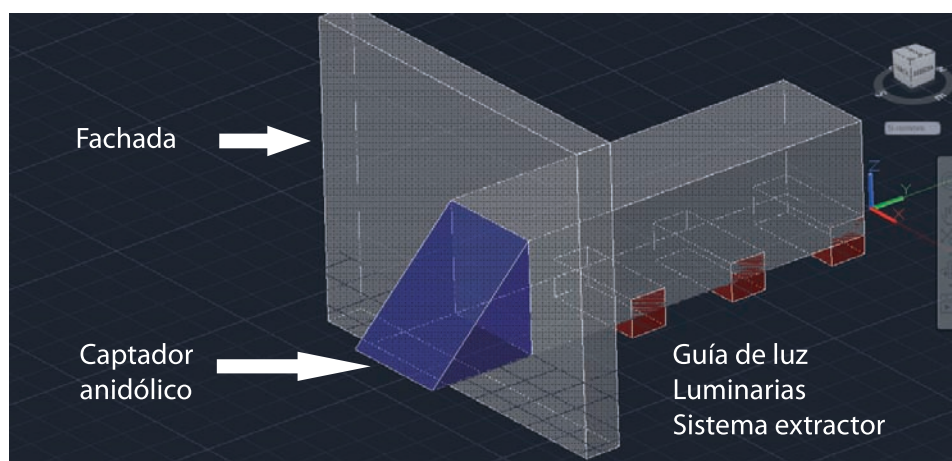


Figura 4.1: Esquema sistema de iluminación con luz natural

Hay tres procesos que deben ser considerados en la fase de diseño:

- Captación: La captación de luz natural que llega a la fachada del edificio se realiza con un sistema óptico anidólico llamado colector o captador. El diseño está optimizado para captación de luz directa. El colector tiene dos funciones principales, la primera recoger el máximo flujo de luz posible y la segunda dirigir ese flujo con una determinada orientación angular al interior del sistema de transporte con el objetivo de incrementar la eficiencia.
- Transporte: Tras captar la radiación solar incidente, se conduce el flujo a aquellas zonas más alejadas de la fachada donde no llegaría luz a través de las ventanas. Esto se lleva a cabo mediante conductos horizontales en el interior del edificio que se van a llamar guías de luz. Estas guías de luz pueden ser guías de aluminio espejadas o bien guías prismáticas que trabajen por reflexión total interna.

## 4.2 Parámetros fotométricos de diseño

---

- **Distribución:** Es necesario extraer la radiación de la guía de luz para lograr una distribución lo más acorde a los parámetros de calidad en relación a la estancia a iluminar, para ello se cuenta con una serie de luminarias espaciadas a lo largo de la guía. La extracción debe contemplar sistemas que permitan una reducción del deslumbramiento molesto o discapacitante por visión directa.

La tipología de los diferentes diseños para iluminación natural [67, 68] se puede dividir en dos conceptos: sistemas con apantallamiento y sistemas sin apantallamiento.

★ **Sistemas con apantallamiento:** Hay dos tipos, originariamente estos sistemas utilizan la radiación difusa y rechazan la directa. Posteriormente aparecen sistemas que emplean la radiación directa dirigiéndola hacia el techo o bien encima de la línea de mirada

★ **Sistemas sin apantallamiento:** Son sistemas diseñados principalmente para dirigir la luz a zonas alejadas de aberturas como ventanas y lucernarios. Pueden o no bloquear la radiación directa. Estos se dividen en 4 categorías.

- Sistemas de guiado de luz difusa
- Sistemas de guiado de luz directa
- Sistemas de difusión
- Sistemas de transporte de luz

Los sistemas de guiado de luz directa no tienen el elemento de transporte mediante guías de luz, por ello la categoría más adecuada para encuadrar este sistema es la de sistemas de transporte de luz. Si bien hay sistemas como el techo anidólico que se engloban en la categoría de guiado de luz difusa que tiene un principio similar aunque esta concebido para aumentar el rendimiento en condiciones de luz difusa.

## 4.2. Parámetros fotométricos de diseño

La iluminación correcta de una estancia va a depender principalmente del uso al que va destinada y de la disposición espacial de la misma. A nivel de proyecto estas circunstancias llevarán a distintos requerimientos que primarán en importancia alguno de los parámetros de diseño sobre el resto. En el presente diseño el ojo humano es el que va a definir los niveles adecuados de iluminación, debido a esto se va a hablar en unidades fotométricas en vez de radiométricas. Estas unidades son pesadas por la curva de respuesta patrón del ojo humano a las distintas longitudes de onda,  $V(\lambda)$ , del espectro visible.

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

### 4.2.1. Iluminancia

Los niveles de iluminancia que deben tener los proyectos diseñados con iluminación eléctrica convencional están definidos en varias normativas y recomendaciones [61, 62, 69]. La iluminancia se describe como:

$$E = \frac{\Phi}{S} [\text{lux o lumen}/\text{m}^2], \quad (4.1)$$

donde  $\Phi$  es el flujo y  $S$  es el área donde se distribuye. Para el proyecto se ha fijado un objetivo ambicioso de 500 lux durante las horas de apertura de las oficinas.

En los proyectos diseñados con iluminación natural, debido a la variación de la radiación solar anteriormente comentada, la iluminancia variará significativamente del orto al ocaso aunque el sistema este diseñado para ser lo más estable posible. Por ello, en el caso de la iluminación natural, la iluminancia se debe evaluar en un periodo lo más amplio posible para obtener una media que sea representativa. Asimismo se podrán obtener medias para periodos concretos como puede ser una estación del año, etc. Esto implica no emplear estrictamente las recomendaciones dadas para luz artificial ya que de ser así nunca sería posible la iluminación con luz natural. Lo que si se debe tener en cuenta en este tipo de proyectos es la unión y control, es decir la simbiosis, de ambos sistemas mediante dispositivos electrónicos de retroalimentación para mantener la iluminación dentro de los parámetros mínimos de utilización.

### 4.2.2. Luminancia

La luminancia es la medida física del brillo. La luminancia esta directamente relacionada con el estímulo visual debido a la cantidad de luz de un objeto respecto a una posición de observación, por ello es otro parámetro importante a tener en cuenta. Siendo objetivo el parámetro más importante a estudiar es la luminancia aunque no siempre es el mejor estudiado debido a la complejidad de evaluación de la luminancia en las simulaciones. La luminancia depende, entre otros, de factores como:

- la reflectancia espectral de las superficies
- posiciones de las luminarias
- posición del observador
- forma, tamaños y posiciones de los objetos

La luminancia puede definirse como:

$$L = \frac{d\Phi}{dA d\Omega \cos \theta} [\text{cd}/\text{m}^2], \quad (4.2)$$

## 4.2 Parámetros fotométricos de diseño

---

donde  $\Phi$  es el flujo luminoso (lúmenes),  $\theta$  es el ángulo entre la normal y la dirección,  $A$  es el área de la superficie ( $m^2$ ) y  $\Omega$  es el ángulo sólido subtendido.

Para el cálculo de la luminancia cuando se obtiene de la iluminancia que incide en un plano en la que hay un objeto con cierta reflectancia:

$$L = \int dE(\theta, \psi) BRDF(\theta, \psi), \quad (4.3)$$

donde  $dE(\theta, \psi)$  es el diferencial de iluminancia en el punto del plano en una dirección indicada por  $\theta$  y  $\psi$ . La BRDF es la función de reflectancia bidireccional del material del que está compuesto el objeto. Para una correcta simulación de luminancias este dato debe ser obtenido con precisión pudiendo describir el material tanto si es isótropo como sino. En el caso de que el material no sea isótropo la simulación se hace más compleja debido al tiempo de cálculo necesario para evaluar todas las direcciones angulares implicadas tanto las de visión como las de incidencia de la luz en el material.

### 4.2.3. Distribución espacial, uniformidad

La distribución espacial de la radiación luminosa en el área de trabajo y en su entorno es importante. La distribución de la iluminancia y de la luminancia es una medida de como varía la luz en los planos de trabajo, cada una con sus matices. La uniformidad se puede entender como un ratio, para la iluminancia se puede definir como la iluminancia media entre la iluminancia máxima o bien como la iluminancia mínima entre la máxima, variando de 0 a 1. Evidentemente cuanto más cerca de uno mejor uniformidad se obtiene. En el caso de la luminancia se define el ratio de luminancia de la tarea respecto a la luminancia de fondo donde el estado de adaptación del ojo es clave.

La evaluación de la uniformidad para la luz natural es compleja ya que se debe calcular para una hora concreta indicativa de una posición del Sol. Un factor de uniformidad puede y debe ser obtenido como una media en periodos definidos más o menos amplios. Los valores de uniformidad para tareas específicas dados en las normativas y recomendaciones de referencia no son de aplicación a la iluminación natural directamente ya que son dados para iluminación artificial. Como norma general los usuarios aceptaran valores más bajos de uniformidad al existir iluminación con luz natural como viene ocurriendo, por ejemplo, en la cercanía de ventanas.

### 4.2.4. Deslumbramiento

El deslumbramiento es la sensación producida por zonas brillantes dentro del campo de visión y puede ser experimentado bien como deslumbramiento molesto o discapacitante [62]. El deslumbramiento causado por la reflexiones en superficies especulares es usualmente conocido como deslumbramiento de velo. En puestos de trabajo en interiores, el deslumbramiento molesto es una sensación de molestia producida por luminancias elevadas o no uniformes en



#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

el campo de visión. Si se satisfacen los límites del deslumbramiento molesto, el deslumbramiento discapacitante no es usualmente un problema importante. Hay diversos métodos para el cálculo del deslumbramiento molesto:

- BGI BRS
- CGI (CIE glare index)
- UGR (Unified glare rating)
- DGI (Daylight glare index)

En 1950 Petherbridge and Hopkinson desarrollan el BRS donde la sensación de deslumbramiento se obtiene de la ecuación desarrollada empíricamente:

$$BGI = 10 \log_{10} 0.478 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1.6} \omega_s^{0.8}}{L_b P^{1.6}}, \quad (4.4)$$

donde  $P$  es el índice de posición de Guth que expresa el cambio en el deslumbramiento molesto provocado por la elevación y el acimut de la fuente de luz relativo a la línea de visión del ojo. EL BGI esta limitado a fuentes pequeñas con ángulos sólidos menores de 0.027 sr [70].

La CIE basándose en la ecuación propuesta por Einhorn [71, 72] propone el CGI donde,

$$CGI = 8 \log_{10} 2 \frac{1 + (E_d/500)}{E_d + E_i} \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \omega_s}{P^2}, \quad (4.5)$$

donde  $E_d$  es la iluminancia directa vertical en el ojo proporcionada por todas las superficies y  $E_i$  es la iluminancia indirecta en el ojo ( $E_i = \pi L_b$ ). EL CGI se desarrolla para corregir la inconsistencia matemática proporcionada por el BRS para fuentes de luz múltiples.

El valor del deslumbramiento molesto de las luminarias de una instalación de alumbrado interior puede determinarse utilizando el método de tabulación del Índice de Deslumbramiento Unificado de la CIE (UGR) [62] basado en la fórmula:

$$UGR = 8 \log_{10} \frac{0.25}{L_b} \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \omega_s}{p^2}, \quad (4.6)$$

donde  $L_b$  es la luminancia de fondo,  $L$  es la luminancia de las luminarias en la dirección del observador,  $\omega$  es el ángulo sólido de las partes luminosas de cada luminarias en el ojo del observador y  $p$  es el índice de posición de Guth para cada luminaria individual que se refiere a su desplazamiento de la línea de visión.

Otro método para el cálculo del deslumbramiento molesto de una instalación de iluminación natural es el DGI (Daylighting glare index) [73] que

## 4.2 Parámetros fotométricos de diseño

da una respuesta subjetiva de una persona a una zona de deslumbramiento grande como una ventana, se calcula para distintas distancias de la persona a la ventana.

$$DGI = 10 \log_{10} 0.48 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1.6} \Omega_s^{0.8}}{L_b + 0.07 \omega_s^{0.5} L_s}. \quad (4.7)$$

Sin embargo el DGI sólo puede emplearse en zonas grandes con luminancias bastante homogéneas como el cielo visto desde una ventana. Si la luminancia proporcionada por el sistema óptico varía temporalmente el DGI no debe usarse.

Aunque el deslumbramiento molesto es un fenómeno que implica gran carga no existe un método unificado para iluminación artificial e iluminación natural debido a las características tan diferentes de ambos tipos de iluminación. Los índices de deslumbramiento desarrollados para la iluminación artificial como el UGR no suelen ser de aplicación directa en situaciones de iluminación con luz natural. Con ángulos sólidos elevados la fuente de deslumbramiento puede llegar a cubrir una parte importante del campo visual del observador incrementando el nivel de adaptación del ojo y reduciendo parcialmente la sensación de deslumbramiento.

Concretando, el UGR es uno de los métodos que se usa como estándar para aplicaciones de iluminación artificial. En cuanto al uso de los índices de deslumbramiento para aplicaciones con iluminación natural hay cierta discusión de los métodos más adecuados para la evaluación del deslumbramiento en iluminación natural [74, 75, 76] ya que depende en gran medida de la tipología de la instalación. Para intentar solventar estas dudas un nuevo comité técnico de la CIE está profundizando en el conocimiento del deslumbramiento molesto de la luz natural además se ha publicado en el año 2002 una nueva recomendación [63] para superar esas limitaciones, desafortunadamente el Director de este comité, el Sr. Einhorn, fallece antes de la finalización de dicho informe y según otros miembros del comité no pudo terminar de dar los detalles de todo su trabajo. Asimismo hay estudios alternativos con experimentación incluida que proponen nuevos métodos de medición con CCDs y de evaluación como el “daylight glare probability (DGP)” [76] aunque dejan la puerta abierta a mayor profundización en el tema. En ausencia de otras alternativas el DGI permanece como el método más aceptado [77], con sus limitaciones, actualmente por investigadores y diseñadores siempre aplicado a aberturas más o menos grandes.

### 4.2.5. Color

La calidad de la luz se mide por diversos parámetros físicos y psicofísicos que van a afectar a la visión de los objetos de una manera determinante dada la fisiología del ojo. Es conocido como la luminancia de un objeto permite una mayor resolución de los detalles visibles para el ojo humano [78], es decir hay un aumento de la agudeza visual. Hay un parámetro importante

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

que muchas veces es olvidado y es el color de la luz, es decir la composición espectral de la misma.

La composición espectral de la luz a la salida de las luminarias varia debido a dos factores, por un lado ya se ha comentado la variación espectral de la radiación solar debido a diversos parámetros como la elevación solar, los factores meteorológicos, etc., por otro lado la reflectancia de los materiales empleados en la guía de luz no es constante con la longitud de onda lo que conlleva que si hay múltiples reflexiones el espectro resultante puede variar de manera significativa [79] con pérdida de alguna región espectral en mayor cuantía. Este comportamiento será de importancia para ciertas condiciones de uso y dependerá en gran medida del diseño final.

Actualmente la calidad de la luz en cuanto al color se obtiene matemáticamente con un parámetro denominado índice de rendimiento de color (“Colour Rendering Index” CRI). Este índice proporciona datos de como se ven ocho muestras de color con la luz de referencia respecto a la luz empleada. El rendimiento de color de la luz resultante puede afectar a la percepción de los colores, la luz natural por definición tiene un índice de rendimiento de color (CRI) del 100 % debido a que comprende todo el rango visible del espectro (380 nm a 780 nm) con mayor o menor aportación.

### 4.3. Diseño sistema anidólico de captación

El sistema anidólico de captación tiene como unidad básica un concentrador parabólico compuesto truncado (TCPC) [57] en uso inverso.

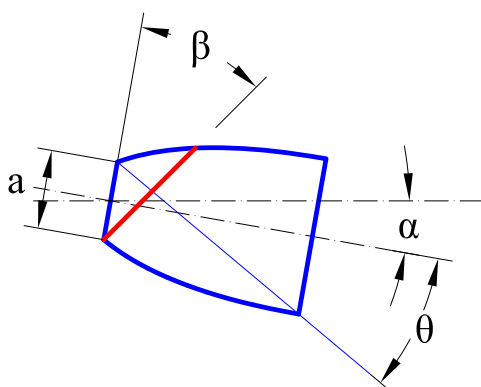


Figura 4.2: Esquema TCPC, línea roja corresponde al troncamiento

Un TCPC se define con los siguientes parámetros, figura 4.2:

- Apertura de entrada del TCPC ( $a$ ): Es el diámetro que tiene el CPC en su abertura más pequeña.
- Ángulo de aceptación ( $\theta$ ): Es el ángulo que describe la geometría básica de un CPC en el sentido en el que aparece descrito en la literatura

### 4.3 Diseño sistema anidólico de captación

específica sobre CPCs. Es decir es el ángulo que forma el eje de revolución del perfil parabólico para formar, por revolución, el CPC. Este parámetro toma valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

- Ángulo de truncamiento del CPC ( $\beta$ ): Es el ángulo que forma el plano de corte del CPC con la superficie de entrada del mismo para dar lugar a un CPC truncado (TCPC). Este parámetro toma valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- Ángulo de inclinación del eje del TCPC ( $\alpha$ ): Es el ángulo que forma el eje de revolución del TCPC con la horizontal. El objetivo de realizar esta inclinación de la unidad es orientar la entrada del TCPC, que en este caso es la superficie más pequeña del mismo y que en los concentradores de energía se toma como superficie de salida, hacia la posición en la cual la radiación solar es máxima, en la localización geográfica para la que se realiza el estudio. Este parámetro toma valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- Espesor del material ( $e$ ): Es el espesor físico que ocupará el material del que esta fabricado el TCPC. Debe ser lo más fino posible desde el punto de vista del rendimiento.

Disposición invertida: La disposición funcional del TCPC es operar en sentido inverso a los CPCs concentradores de radiación, es decir disponer la superficie más pequeña de un CPC (a) como superficie de entrada de la radiación. A esta configuración se la denomina CPC Truncado Inverso. La superficie de entrada del TCPC es la que en un sistema captador de energía sería la de salida, mientras que la de salida sería la de entrada. Esto hace que en el caso del TCPC capta, si no tenemos en cuenta el efecto del truncamiento, con  $2\pi$  y sale con ( $\theta$ ) que es el objetivo de este elemento.

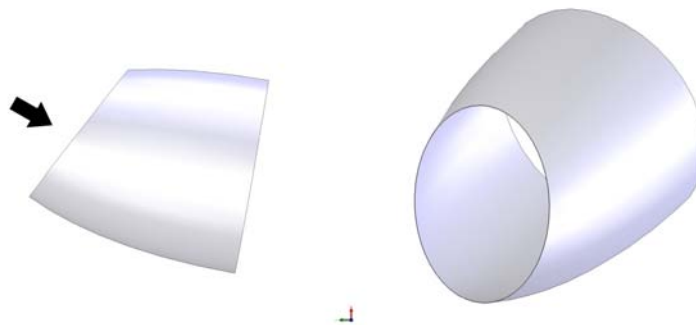


Figura 4.3: TCPC alzado y perspectiva

El truncamiento permite ampliar de manera importante el área de captación obteniendo un incremento en el flujo a la salida del captador.

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

### 4.3.1. Disposición matricial y compactación

El sistema de captación se ha de instalar en una abertura rectangular, por ello se propone una distribución de los elementos en formato matricial para poder adaptarlo a la abertura necesaria. Si se disponen los elementos conexos entre sí esto provoca huecos que no están funcionando correctamente al incidir la radiación en la parte externa de cada unidad. Con el objetivo de minimizar estos huecos aumentando la eficiencia se propone un diseño con una compactación que puede ser en los dos ejes del sistema.

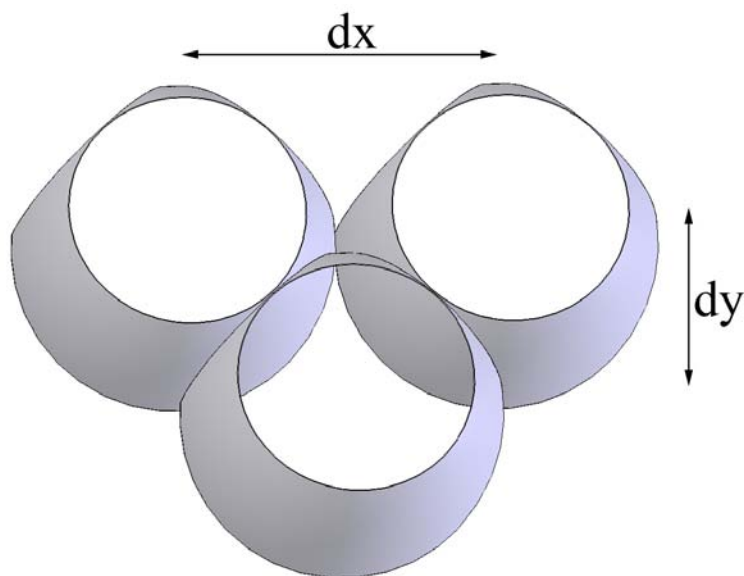


Figura 4.4: TCPC Compactación

Compactación X ( $dx$ ): Es la distancia en la dirección del eje X que se desplaza una unidad sobre la alineación de la unidad inferior, para formar la matriz, de forma que se consigue una compactación en la dirección de dicho eje X. Este parámetro aparece acotado en la figura 4.4 y puede tener cualquier valor real  $> 0$ .

Compactación Y ( $dy$ ): Es la distancia en la dirección del eje Y que se desplaza una unidad sobre la alineación de la unidad inferior, para formar la matriz, de forma que se consigue una compactación en la dirección de dicho eje Y.

El funcionamiento del TCPC Matricial se basa en aprovechar al máximo las superficies sobre las que incide la radiación directa del Sol, si bien también usa, en menor medida, la radiación difusa. Hay dos zonas de máxima penetración, la de invierno y la de verano. De modo que el objetivo, tanto de los valores de compactación ( $dx$ ,  $dy$ ), como del resto de parámetros que lo definen, consiste en maximizar la superficie eficaz del TCPC matricial para que la eficiencia del sistema sea lo mayor posible. Los valores de compactación ( $dx$ ,  $dy$ ) provocan solapamiento entre las diferentes unidades

### 4.3 Diseño sistema anidólico de captación

---

TCPC, este solapamiento hace que se interfieran superficies entre sí. Para que existan interferencias se eliminan las superficies que no reciben radiación directa del Sol. Con ello se pretende optimizar la cantidad de radiación que se transmite a lo largo de una guía que se situará a continuación del TCPC Matricial. También es posible el uso del TCPC Matricial sin guía, de tal forma que mande directamente la radiación hacia el fondo del local. En cualquiera de los dos casos se debe dar preponderancia a la radiación que sale con ángulos cercanos a la horizontal, dando lugar a un número menor de reflexiones en el sistema de transporte de radiación y con ello más eficiencia energética.

Si se quiere que las superficies de entrada de los TCPC queden alineadas en la superficie de entrada de la matriz de acuerdo con el ángulo de truncamiento se debe calcular los parámetros de compactación en función de dicho ángulo y del ángulo de inclinación.

Para la definición de los parámetros expuestos con anterioridad se pueden utilizar sistemas de optimización que establezcan una función de mérito entre los parámetros que definen el TCPC Matricial y las variables que definen la calidad de la iluminación buscada en el espacio al que va destinada la luz que capta el dispositivo. Por ejemplo, es posible calcular la luz que va incidiendo en una serie de dispositivos con diferentes parámetros cada cierto intervalo de tiempo, dependiendo de la precisión que se pretenda conseguir y del tiempo de cálculo que se desee invertir en el mismo. Una vez realizado el proceso se selecciona aquella solución que cumple mejor con los requisitos fijados, por ejemplo la que más energía capta o la que tiene más uniformidad en una determinada distribución espacio-temporal, o cualquier otro requerimiento que se considere necesario.

Al objeto de mejorar la eficiencia del sistema se deberá procurar que las unidades de TCPC sean lo más especulares posibles, es decir que su factor de reflexión sea lo más próximo que se pueda a la unidad. Por el mismo motivo debe intentarse que el espesor de las paredes que definen cada unidad de TCPC sea mínimo, siempre que se mantenga la rigidez estructural.

El espacio entre unidades de TCPC puede, en función de las dificultades tecnológicas y de coste, dejarse libre o bien disponerse de reflectores que dirijan la radiación hacia la superficie de entrada del TCPC.

El uso de materiales dieléctricos en vez de aluminio puede ser también estudiado con objeto de mejorar el rendimiento.

#### 4.3.2. Evaluación del rendimiento de la matriz TCPC

Para evaluar el funcionamiento de este dispositivo se diseña una matriz de TCPC con las siguientes características:

- Ángulo de salida de la luz,  $\theta$ :  $40^\circ$ . En la geometría del CPC se llama ángulo de aceptación pero dado que el TCPC se usa en sentido inverso este parámetro debe llamarse ángulo de salida.

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

- Apertura de entrada del TCPC (a): 40 mm
- Ángulo de truncamiento del CPC ( $\beta$ ):  $28^\circ$
- Ángulo de inclinación del eje del TCPC ( $\alpha$ ):  $10^\circ$
- Ángulo de inclinación de la matriz ( $\gamma$ ):  $\beta + \alpha$
- Compactación dx, dy: 82.09 mm y 67.25 mm

Estos parámetros definen la inclinación del plano de la matriz de TCPC a  $52^\circ$  de la horizontal ( $90 - \gamma$ ), figura 4.5 donde se observa un diagrama “onion” que representa la radiación solar (lux) para Madrid para una inclinación de  $52^\circ$  durante un periodo anual completo. Para Madrid la elevación solar máxima en los solsticios es de  $73.01^\circ$  en verano y de  $26.13^\circ$  en invierno.

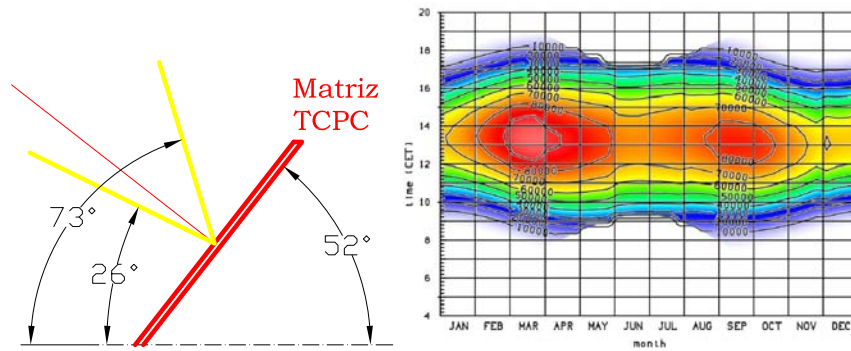


Figura 4.5: Esquema inclinación matriz TCPC y radiación solar (lux) Madrid a  $52^\circ$  Sur cielo claro

Los parámetros que van a definir el diseño del captador anidólico deben ser posteriormente optimizados para aumentar el rendimiento según unos criterios establecidos. Debido al diferente movimiento aparente solar según la localización no habrá un diseño único sino que cada diseño se deberá optimizar para una localización concreta con el objetivo de alcanzar el máximo rendimiento. A priori no parece que un único diseño sea viable desde el punto de vista óptico puesto que habría mermas en el flujo obtenido dependiendo de la localización y orientación. La orientación que va a tener el eje del sistema es importante en la fase de diseño, para un primer estudio determinaremos que la orientación será Sur.

En el caso de la matriz obtenida con estos parámetros hay un área efectiva por donde puede entrar la radiación solar del 76.9 % con lo que el área no utilizada es del 23.1 %, correspondiente a los intersticios entre unidades.

Se va a evaluar la eficiencia del sistema sólo con el captador con objeto de validar este nuevo concepto. Para ello se va a realizar un trazado de rayos utilizando la matriz TCPC descrita antes con una reflectancia del material de  $\rho = 1$  y un haz de rayos colimado. Se va a trazar para elevaciones solares

### 4.3 Diseño sistema anidónico de captación

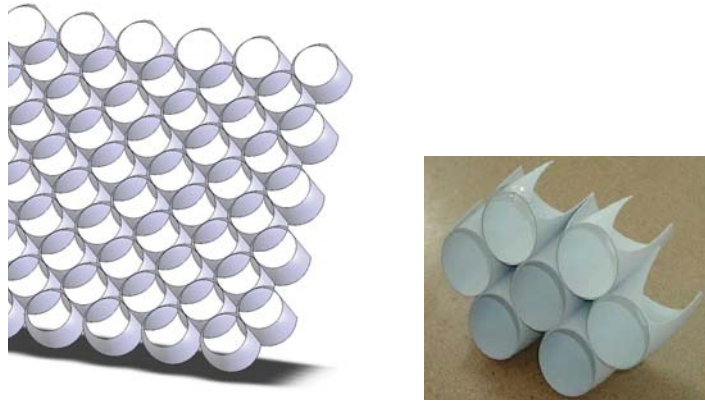


Figura 4.6: Matriz TCPC y prototipo 3D (estereolitografía sobre resina plástica)

de 0 a 90° con dos incidencias acimutales, orientación Sur y orientación Sur-Este.

En la figura 4.7 se observa la eficiencia según la incidencia de la radiación solar. Para una incidencia Sur se obtiene un rendimiento medio para todas las elevaciones solares del 78.1 % y para una incidencia Sur-Este se obtiene un rendimiento medio del 77.5 %. Se puede ver como la eficiencia del dispositivo es siempre muy estable ya que incluso en las peores condiciones su rendimiento se encuentra comprendido en la franja del 75 % al 80 %. Aún teniendo en cuenta que se ha calculado para condiciones ideales un rendimiento medio como el obtenido permite ser optimistas en cuanto a la viabilidad del captador.

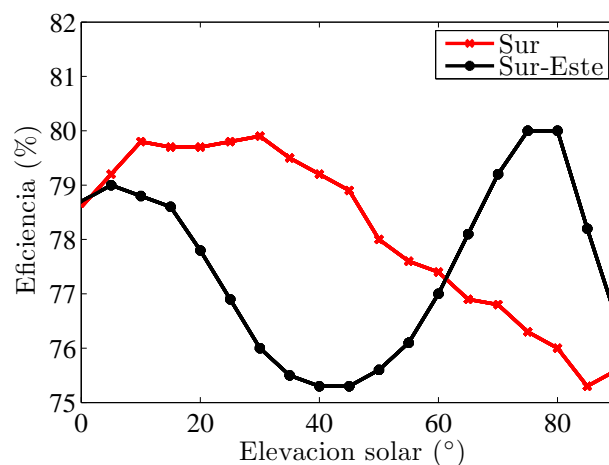


Figura 4.7: Eficiencia Matriz TCPC sin guía de luz

Se ha visto que el sistema de captación tiene un rendimiento bueno y mantenido a lo largo del movimiento del Sol. Ahora se va a realizar un



#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

trazado de rayos pero incorporando una guía de luz hueca de aluminio con los siguientes parámetros y geometrías:

- Reflectancia TCPC ( $\rho_{tcpc}$ ): 0.95
- Reflectancia GUÍA ( $\rho_{guia}$ ): 0.97
- Dimensión x, guía: 1 metro
- Dimensión y, guía: 0.3 metros
- Dimensión z, guía: 10 metros

En la figura 4.8 se observa la eficiencia del sistema medida como la luz que entra en relación a la luz que llega al final de la guía de luz. A modo de valoración se han incluido los rendimientos de la guía de luz sin el sistema captador. Todo ello se hace para el rango de elevaciones solares de 0 a 90° y un acimut respecto al eje de la guía de 0, 30 y 60°. El empleo en este estudio de eficiencias más bajas que la unidad y próximas a los valores reales que se pueden conseguir tanto en el captador anidólico real como en la guía de luz permiten una valoración correcta de estos datos para su aplicación.

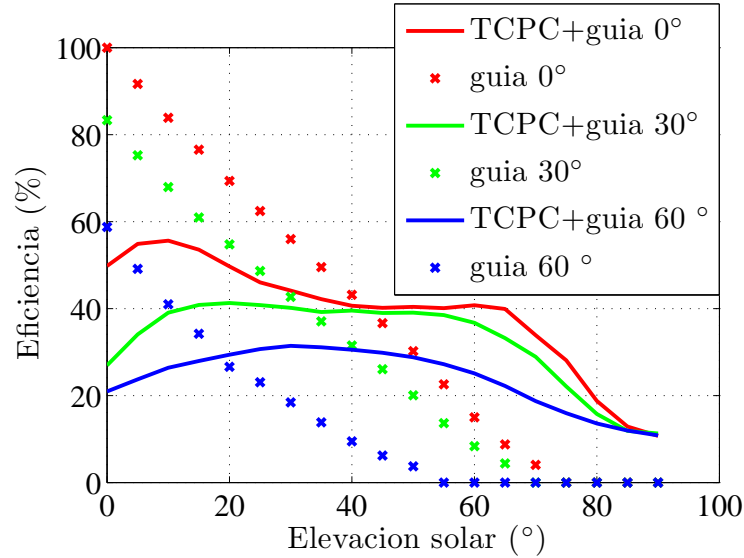


Figura 4.8: Eficiencia Matriz TCPC con guía de luz

##### 4.3.3. Optimización matriz TCPC

La localización y orientación del dispositivo ha de fijarse previamente antes de comenzar el proceso de optimización. Sino se fijase esta orientación habría que buscar una función de mérito compleja ya que encontrar un mejor rendimiento para todas las localizaciones y orientaciones llevaría a un

### 4.3 Diseño sistema anidólico de captación

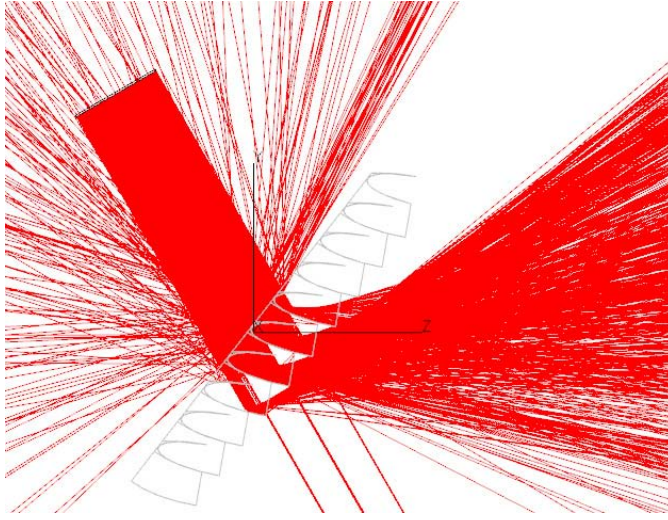


Figura 4.9: Trazado rayos Matriz TCPC, elevación  $60^\circ$  incidencia Sur-Este

sistema que tendría una eficiencia baja. Se considera mejor opción optimizar para una localización concreta con el objetivo de mejorar el rendimiento y/o uniformidad local. La optimización depende de varios parámetros constructivos, tabla 4.1.

Elemento	Parámetros
TCPC	$\alpha, \beta, \theta, \gamma(\beta, \alpha)$
Compactación	$dx, dy$
Fabricación	$e, \rho$

Tabla 4.1: Parámetros optimización matriz TCPC

Para evaluar la optimización se simulará el flujo máximo que proporciona el captador solar a lo largo del año así como la uniformidad. Con el objetivo de hacer una evaluación en condiciones de funcionamiento se instala detrás del captador una guía de luz con  $\rho_{guia}$  97 %, de 10 metros de longitud y una sección de 1 metro de ancho x 0.3 metros de alto. Las distintas configuraciones son evaluadas mediante trazado de rayos para distintos parámetros obteniéndose datos de flujo y uniformidad que servirán para seleccionar el captador más adecuado.

El proceso de optimización se ha realizado por otro socio del proyecto, BLL, ya que posee un sistema de servidores capaz de realizar el trabajo en un tiempo reducido y comprende parámetros y algoritmos que debido al desarrollo industrial no deben ser publicados.

En la tabla 4.2 se observan, para distintas configuraciones constructivas, datos de flujo y uniformidad para una orientación sur con localización en Madrid. Se ha elegido la matriz VarG 12 como mejor opción para esa localización, aunque no es la que tiene máximo flujo mantiene una uniformidad

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidónico

Matriz TCPC	$\theta$	$\gamma$	$\alpha$	dx	dy	Klm h	<i>min/max</i>
Var 09	AA	55	20	0	0	12364	0.796
VarN 02	AA	55	20	118.1	65	13724	0.768
VarG 12	AA	56	20	111.5	61.4	14546	0.694
VarN 29	AA	50	22	90	50	14901	0.586
VarB 29	AA	53	24.4	98.1	28	16492	0.496
VarSG 06	AA	64.4	28.8	76.2	33.8	18968	0.304
VarL 01	AA	72.5	33.2	89.2	0.0	23520	0.166

Tabla 4.2: Matrices TCPCs optimizadas, AA: dato no revelado

aceptable. Se observa que al aumentar el flujo la uniformidad baja de manera importante.

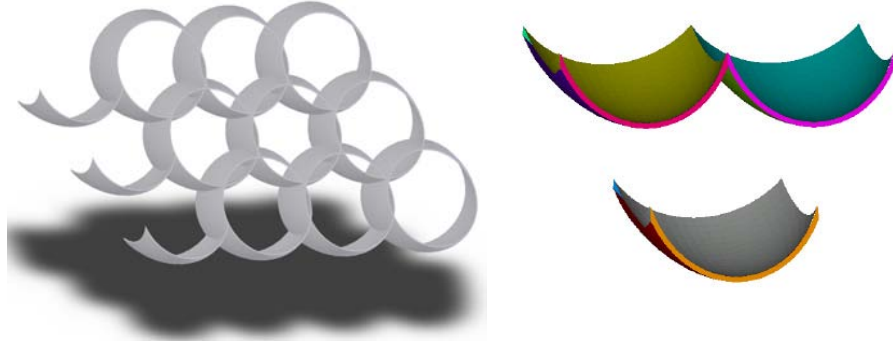


Figura 4.10: Matriz TCPC inicial (izquierda) y diseño VarG12 (derecha)

La matriz compactada, figura 4.10, esta compuesta por las unidades TCPC. La eliminación del material que esta solapándose permite obtener el resultado final que conforma la matriz propuesta mediante la unión de las distintas partes útiles de cada unidad.

#### 4.4. Transporte y distribución

El sistema de transporte consiste en una guía de luz de aluminio rectangular de alta calidad óptica con una reflectancia  $\rho_{guia} = 0.97$  dispuesta de forma horizontal. Para las simulaciones se va a emplear una reflectancia isotrópica en todas las direcciones y en todas las longitudes de onda, esto es una aproximación ya que estudios que se han hecho [79, 80] indican que la reflectancia en el aluminio depende de la longitud de onda de la luz incidente. En una ampliación posterior del trabajo se deberá trabajar en eliminar esta aproximación con el objetivo de determinar la calidad de la luz a la salida en cuanto a su color y composición espectral. Probablemente el empleo de guías prismáticas huecas podría solventar el cambio de color de la luz producido por la reflectancia anisotrópica de los aluminios comerciales.

## 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

---

El sistema de distribución o de extracción es el formado por las luminarias solares y sus complementos que van a estar diseñados con aluminio de distintas características en cuanto a reflectancia pero que no deben ser comentados en esta tesis por ser parte del secreto industrial.

### 4.5. Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

El sistema completo [65, 66] esta compuesto en su parte óptica de: un captador anidólico de radiación solar, una guía de luz y sus correspondientes luminarias solares. Se va a evaluar mediante trazado de rayos el sistema en su conjunto para obtener una aproximación del funcionamiento real del sistema.

La instalación de sistemas de iluminación natural en edificios de nueva construcción implica una consideración arquitectónica global para la correcta adaptación e integración de las estructuras necesarias. En el caso de la instalación en edificios existentes se ha de tener en consideración la disponibilidad de espacio en el falso techo para que el sistema se adapte correctamente. El sistema, figura 4.11, va a tener las siguientes dimensiones:

- Largo guía: 11 metros
- Ancho guía: 1.1 metros
- Alto guía: 0.5 metros

Según arquitectos consultados uno de los parámetros dimensionales que más puede limitar es el alto de la guía, se ha elegido un alto de 0.5 metros que corresponde al máximo que se ha recomendado. Esto hace viable la instalación en edificaciones actuales aunque al ajustarse a la altura máxima recomendada puede la instalación no sea posible en ciertas edificaciones. En edificaciones *ad hoc* que se diseñen expresamente pensando en el sistema las dimensiones no deben ser un problema y podrán ser ajustadas para captar el flujo necesario dependiendo de las estancias a iluminar.

#### 4.5.1. Eficiencia del sistema

En cuanto a las características ópticas de los materiales empleados en la simulación se han elegido las siguientes reflectancias por ser similares a las que se conseguirán en el prototipo real:

- Reflectancia colector TPC ( $\rho_{tcp}$ ): 0.90
- Reflectancia guía de luz ( $\rho_{guia}$ ): 0.97
- Reflectancia sistema extractor ( $\rho_{lum}$ ): 0.97

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

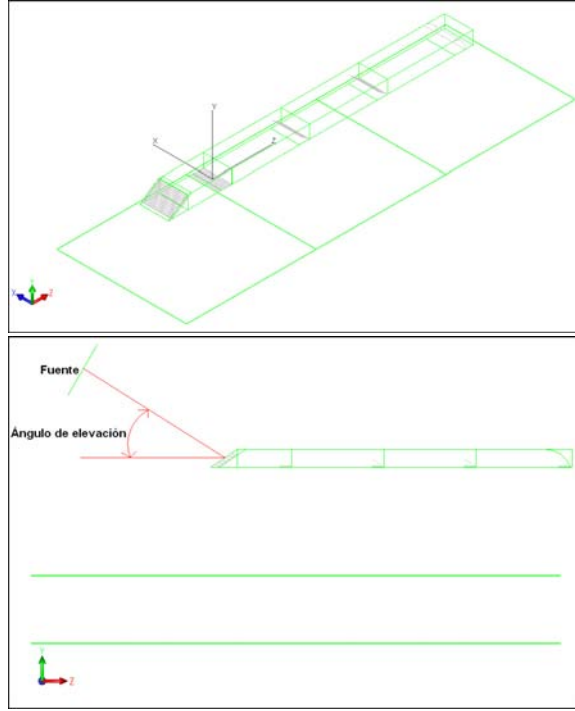


Figura 4.11: Esquema sistema de iluminación

Los dos movimientos que realiza la tierra alrededor del Sol son el movimiento de rotación alrededor de su eje Norte-Sur con un periodo de 24h y el de traslación alrededor del Sol que tiene una periodicidad anual. Estos movimientos vistos desde un observador situado en la tierra dan lugar al movimiento aparente del Sol, para el estudio de este movimiento aparente se utilizan las cartas solares. Una carta solar es una representación gráfica sobre un plano de la trayectoria aparente del Sol para una latitud dada. Se basan en la proyección cónica o cilíndrica de las trayectorias del Sol en la bóveda celeste sobre una superficie plana. En ellas se puede leer la hora solar del día así como el acimut y la altura solar. Para hacer una estimación del funcionamiento del sistema se han elegido siete supuestos de posiciones solares para realizar el trazado de rayos, en la tabla 4.3, se observa el acimut y la altura solar junto con la fecha correspondiente.

Estas siete posiciones suponen un muestreo de 7 ángulos solares pero corresponden a 26 días en el calendario como se representa en la tabla anterior. Respecto al cálculo hay 4 luminarias en cada guía de luz y se va a calcular la eficiencia de cada una de ellas como:

$$\eta_{luminaria} = \frac{\Phi_{salidaluminaria}}{\Phi_{entradacolector}} \quad (4.8)$$

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

Acimut (°)	Altura (°)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
0	60	18-4 13:14	27-8 13:17		
30	30	11-2 11:43	1-11 11:12	11-2 15:15	1-11 14:44
60	60	31-5 11:21	14-7 11:29	31-5 15:04	14-7 15:11
69	37	16-4 9:58	28-8 9:59	16-4 16:31	28-8 16:33
16	27	17-1 12:23	27-11 12:01	17-1 14:25	21-11 14:03
56	56	10-5 11:15	4-8 11:24	10-5 15:07	4-8 15:17
75	33	19-4 9:32	25-8 9:35	19-04 16:56	25-08 16:59

Tabla 4.3: Posiciones simuladas

Por ello la eficiencia total del sistema es:

$$\eta_{sistema} = \sum_{i=1}^{i=4} \eta_{luminarias} \quad (4.9)$$

Se ha creado una macro con el lenguaje de programación Schemers para que el programa de trazado de rayos [31] permita dejar una máquina calculando sin intervención humana para obtener los datos. Hay que calcular 7 posiciones por 4 luminarias lo que implica 28 cálculos distintos con una media de 4 horas por cálculo hacen 112 horas ininterrumpidas, es decir casi cinco días completos. Como se verá en el apéndice A los cálculos por trazado de rayos pueden ser optimizados para tener iguales resultados en un tiempo inferior con el uso de ciertas técnicas informáticas.

En la figura 4.12 se muestran las eficiencias totales obtenidas para cada posición solar simulada. Asimismo se muestra la eficiencia individual de cada luminaria. La eficiencia media ponderada de todas las posiciones es de 43.1 % empleando aluminios especulares con una calidad como la descrita anteriormente. Hay 5 posiciones con una eficiencia >40 % siendo la eficiencia mayor del 64.2 % y la menor del 16.8 %. Un sistema de iluminación natural como el presentado con el alto rendimiento obtenido al tener una media tan alta permite ser optimistas en una aplicación real del sistema. Como en todos los sistemas de iluminación natural el uso sincronizado de sistemas de luz artificial será indiscutiblemente necesario.

##### 4.5.2. Planos de iluminancia

La obtención de planos de iluminancia mediante trazado de rayos es compleja debido al número de rayos que se deben trazar para obtener un plano de iluminancia con buena resolución y fiabilidad. Se propone obtener un plano de iluminancia de 15 metros de largo por 5 de ancho, lo que representa una superficie de 75 m<sup>2</sup>. El plano de trabajo va a estar situado a 1.85 m de distancia de la guía de luz. El sistema óptico es complejo por estar compuesto de muchas superficies, esto implica un empleo intensivo de los recursos del ordenador y va a reducir el número de rayos que se pueden

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

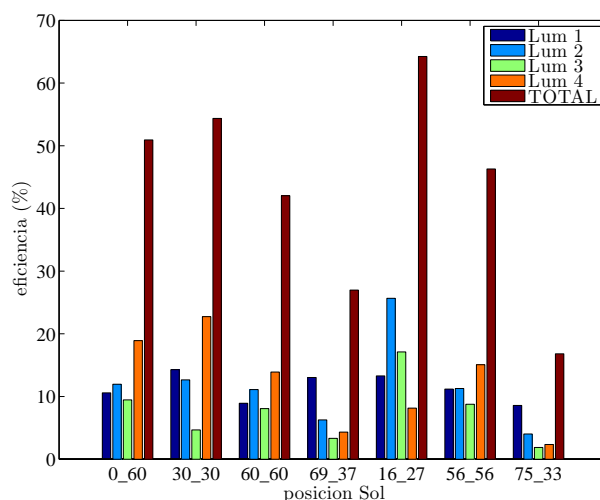


Figura 4.12: Eficiencia luminarias y total para 7 posiciones solares

trazar. Inicialmente se trazan cuatro millones de rayos, número máximo que permite el sistema en estas condiciones, y se obtiene un plano de iluminancia.

##### 4.5.2.1. Optimización planos

La obtención de planos de iluminancia correctos implica un procesamiento de la información obtenida con el objeto de mejorar la uniformidad local. Al mantener un tiempo de cálculo razonable dentro del número de medidas a realizar no se obtiene un plano de iluminancia correcto en cuanto a la uniformidad en la distribución local. Un primer paso en la optimización de la imagen impone un filtrado con el objetivo de obtener un suavizado, manteniendo las manchas de luz no locales. Concretamente, la imagen obtenida tiene 4500 x 1500 píxeles, se le pasa un filtro de media móvil con un kernel de convolución de 10x10 vecinos para que interactúe a nivel de esos diez píxeles. Este filtrado local permite eliminar los puntos de alta intensidad que se producen por tener pocos rayos en la zona próxima y por ello la media de iluminancia sale tan elevada. Otro paso importante para la visualización del plano es presentar los datos de manera logarítmica con objeto de diferenciar los valores con diferencias de órdenes de magnitud que no se verían en una escala lineal. Se ha escogido una función tipo raíz cuadrada por proporcionar datos visualmente más adecuados.

En la figura 4.13 se observan los pasos seguidos para optimizar el plano de iluminancia, imagen sin procesar → imagen filtrada kernel 10x10 → imagen datos función raíz cuadrada.

Otro paso en la optimización comprende aumentar el número de rayos con objeto de mejorar la distribución del plano de iluminancia, para trazar ese número tan elevado de rayos se ha empleado una técnica novedosa que consiste en dividir la fuente que emite los rayos en múltiples fuentes, tantas

## 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

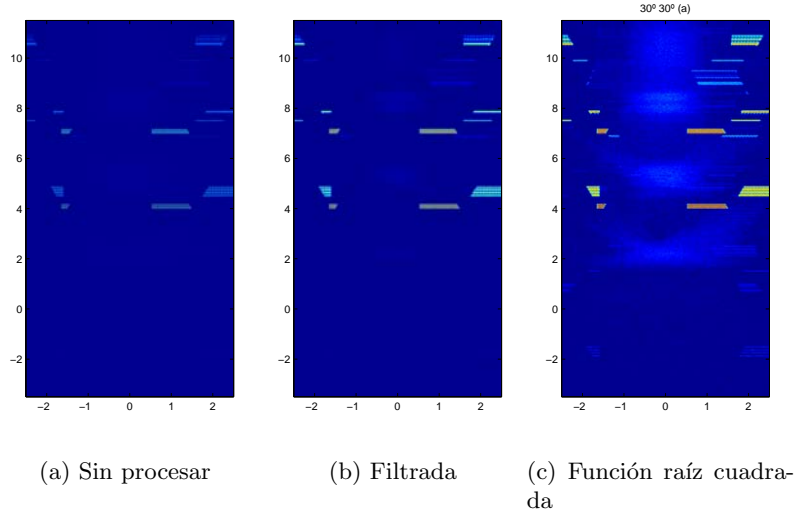


Figura 4.13: Procesado de planos de iluminancia

como sean necesarias. Se hace un trazado individual de cada fuente y se obtiene el plano de iluminancia para cada fuente. Esta tarea se ha automatizado mediante macros programables para permitir al ordenador cálculos tan largos en el tiempo como sean necesarios. Los planos obtenidos por el trazado de cada fuente se procesan posteriormente con Matlab para obtener la imagen que corresponde al plano final. Si la matriz en la que se ha dividido la fuente  $m \times n \rightarrow \infty$  se podría llegar a trazar un número de rayos tan elevado como fuese necesario en aras de obtener una buena precisión. Lógicamente hay que poner un límite ya que el tiempo de cálculo aumenta conforme aumenta el número de rayos.

En la figura 4.14 se presentan dos planos de iluminancia para el mismo sistema con distinto número de rayos para una incidencia solar de acimut  $30^\circ$  y elevación  $30^\circ$ . En el caso de la figura (a) se ha trazado con 4 millones de rayos lo que proporciona un plano de iluminancia que no define bien toda la superficie, para el caso de la figura de la derecha (b), trazada con 25 millones de rayos, se observa que hay mayor precisión en la medida. Se ha de tener en cuenta, para poder comparar, que las unidades de ordenadas en un caso van de -3.5 a 11.5 metros y en (b) van de 0 a 15 metros, en ambos casos el 0 corresponde al inicio de la guía de luz.

Si se observa la figura en el eje de ordenadas a la altura de 4 a 5 metros aparecen 4 formaciones de iluminancia elevada que están representadas en ambos planos, en cambio en la zona que va de 8 a 12 metros no hay correspondencia exacta con las zonas de máxima iluminancia. En el caso de la figura (b) se observan unas zonas en forma de arco que no aparecen en la figura que tiene menor número de rayos. Como se verá en el apartado de prototipado la imagen (b), que tiene 25 millones de rayos, es acorde con los



#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

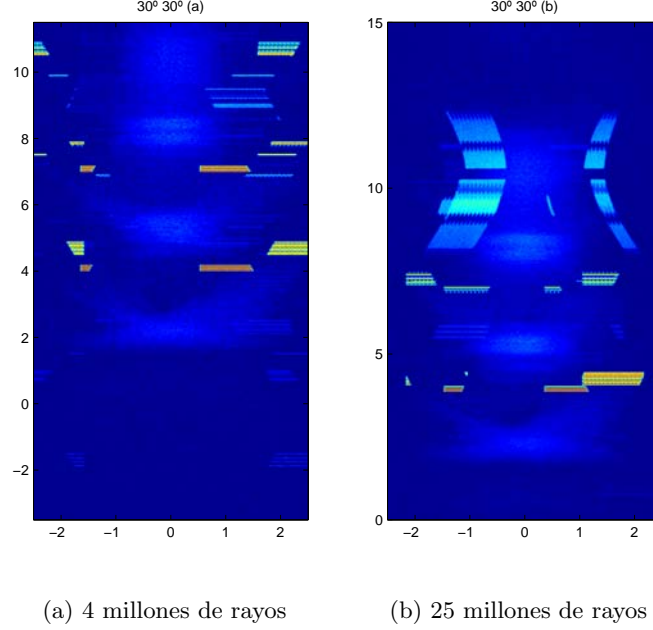


Figura 4.14: Incremento de precisión de 4 a 25 millones de rayos

datos reales obtenidos en la medición de un prototipo escalado.

##### 4.5.2.2. Resultados simulación básica

En este apartado se presentan los planos de iluminancia obtenidos para la configuración básica que tiene las siguientes propiedades ópticas de los materiales:

- Reflectancia TCPC ( $\rho_{tcp}$ ): 0.95
- Reflectancia GUÍA ( $\rho_{guia}$ ): 0.97

En primera aproximación, simulación básica, se va a tratar el aluminio de la guía como si fuese perfectamente especular en cuanto a su función de reflectancia bidireccional (BRDF). En las siguientes figuras se presentan los planos de 15 metros de longitud con un ancho de 5 metros. Para mejorar la apreciación de los detalles se ha pasado un filtro con objeto de hacer un suavizado y posteriormente se ha pasado una función raíz cuadrada con objeto de resaltar datos del fondo que quedan tapados en la escala por tener valores mucho más elevados en otras zonas. Se han estudiado las siete posiciones definidas con anterioridad: acimut  $0^\circ$  elevación  $60^\circ$ , acimut  $30^\circ$  elevación  $30^\circ$ , acimut  $60^\circ$  elevación  $60^\circ$ , acimut  $69^\circ$  elevación  $37^\circ$ , acimut  $16^\circ$  elevación  $27^\circ$ , acimut  $56^\circ$  elevación  $56^\circ$  y acimut  $75^\circ$  elevación  $33^\circ$ .

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

---

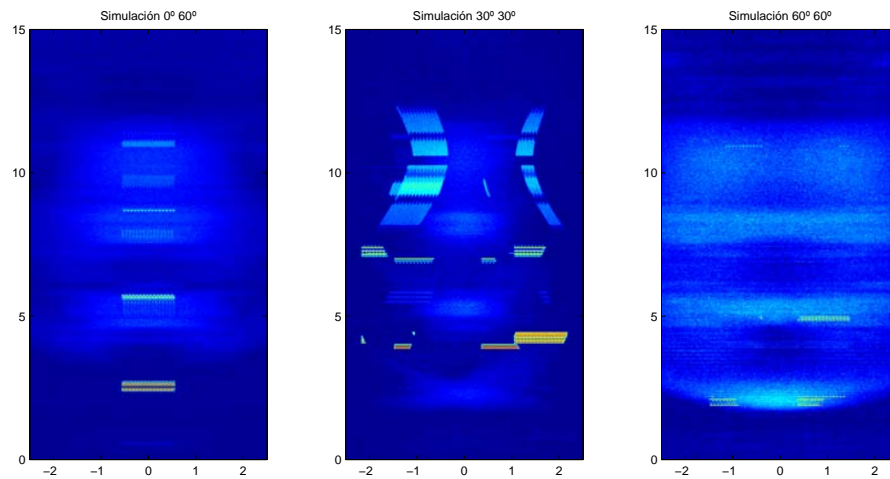


Figura 4.15: Planos de iluminancia simulación básica

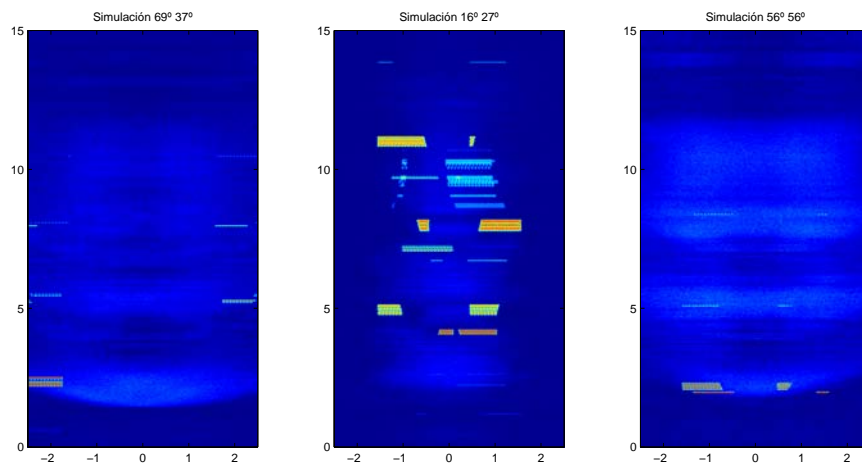


Figura 4.16: Planos de iluminancia simulación básica

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

### 4.5.3. Uniformidad en zonas de alta iluminancia (Hot Spots)

En los planos de iluminancia obtenidos para la configuración básica se aprecian zonas de iluminancia muy elevada que se han llamado hot spots. Estas zonas de alta iluminancia deben ser mejoradas por dos motivos, uno el de distribuir la luz de manera más uniforme y otro el de eliminar posibles zonas de deslumbramiento. Esta mejora debe mantener la eficiencia del sistema en límites aceptables. Para comprobar de dónde proviene la radiación luminosa que esta produciendo estas zonas de alta iluminancia se debe investigar si proviene de radiación que incide en el captador anidólico o bien es radiación solar directa que esta entrando en la guía de luz sin incidir en la óptica del colector. Para ello se configura el colector como absorbente de la radiación,  $\rho_{t_{pc}} = 0$ , y se simulan las siete posiciones solares. En la figura 4.17 se observa, para la posición solar acimut  $60^\circ$  y elevación  $60^\circ$ , que la zona del fondo ya no pasa y que las zonas de hot spot, aunque en este caso son suaves, siguen pasando. Esto indica que la formación de hot spots proviene de luz que entra directamente en la guía sin incidir en el captador. Para otras posiciones, figura 4.18, se observa el mismo comportamiento. En la zona central hay un fondo que se distribuye por toda la zona del plano de iluminancia, este fondo no esta en la imagen de la izquierda que corresponde al trazado de rayos con el colector absorbente. Esto indica que el colector esta distribuyendo de manera regular el flujo recibido por casi todo el área de estudio.

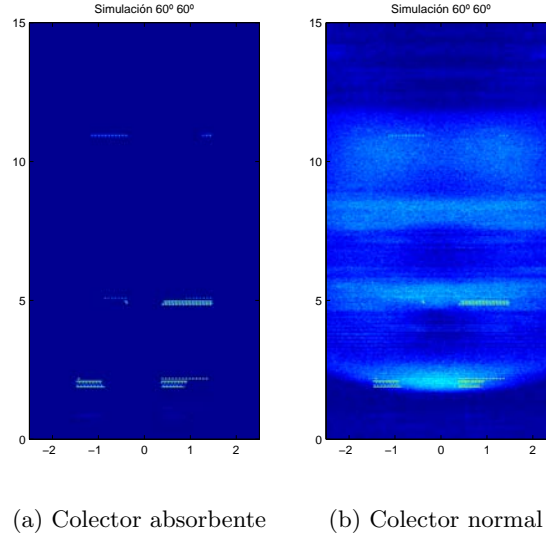


Figura 4.17: Planos de iluminancia, posicion  $60^\circ$   $60^\circ$

Para mejorar este comportamiento se propone el uso de materiales difusores en la zona inicial de la guía de luz. Los difusores habituales son materiales que producen una difusión grande lo que, en este tipo de sistemas,

## 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

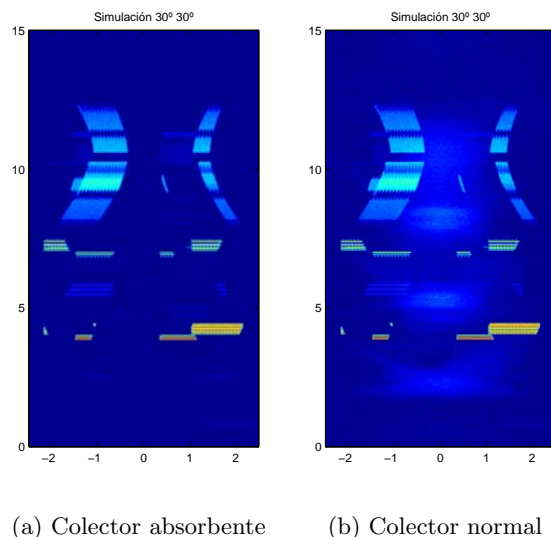


Figura 4.18: Planos de iluminancia, posición  $30^\circ$   $30^\circ$

implica una reducción de flujo importante debido al aumento en el número de reflexiones internas en la guía. El uso de materiales con un comportamiento ambivalente con componente reflectora y difusora es posible gracias a la introducción de nuevos materiales en la industria del aluminio. Concretamente, Alanod dispone de un material llamado Softgloss Miro 720 y 722 diseñado a partir de una extrusión de un perfil sinusoidal que proporciona una apertura del haz de luz parametrizable.

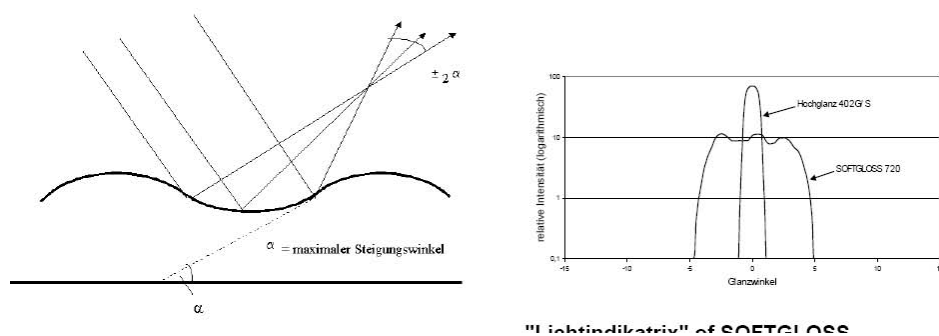


Figura 4.19: Softgloss esquema funcionamiento

Dado que Alanod no proporciona cotas precisas de los materiales para proceder a la simulación por ordenador primero se ha obtenido el perfil mediante Microscopía Confocal, figura 4.20. De la topografía 3D obtenida se realiza un perfil y estadísticamente se obtiene una media de la zona medida. A partir de este perfil se realiza una extrusión que permite simular el difusor en 3D mediante trazado de rayos. Debido al elevado número de superficies

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

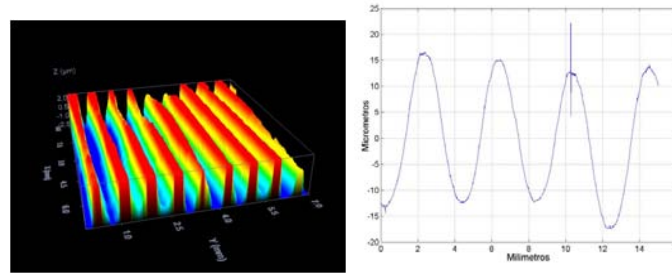


Figura 4.20: Softgloss 720, perfilometría con microscopía confocal

que genera un estructura tan pequeña se ha optado por escalarla de manera que sea más grande para emplearla en las simulaciones, esto permite mantener las propiedades ópticas del material reduciendo el tiempo de cálculo. En la figura 4.21 se observa un trazado con una incidencia de un haz de rayos colimado a  $45^\circ$  sobre una lámina del material difusor escalado, evaluando la apertura angular del haz reflejado se puede afirmar que el material escalado es equivalente ópticamente al no escalado.

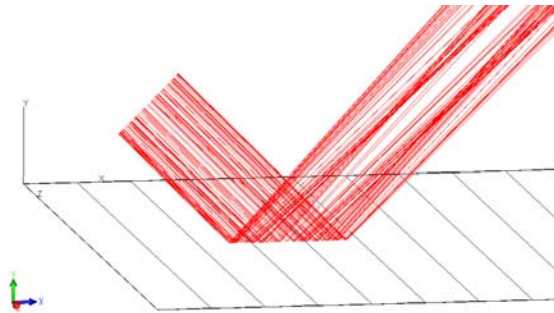


Figura 4.21: Trazado de rayos incidencia longitudinal en material Softgloss a  $45^\circ$

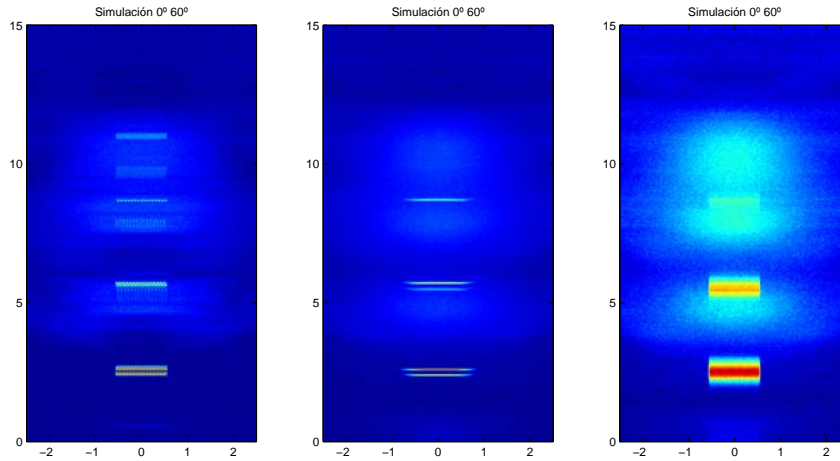
La uniformidad aumenta con el uso del difusor colocado en posición transversal, para una interpretación de la eliminación de los hot spots se realiza un perfil de ambas configuraciones, figura 4.23. La disminución de los picos altos de iluminancia es elevada, reduciendo cerca de un factor 6 los mismos.

Esta reducción de los picos de iluminancia afectará a la uniformidad del sistema, por ello calcula la eficiencia para el sistema completo con los difusores transversales incorporados.

Como era de esperar la eficiencia baja en torno a un 18 %, se han realizado pruebas con otros sistemas para eliminar los picos de iluminancia y la eficiencia baja en torno a un 50 %. Es particular el que la eficiencia con el sistema longitudinal sea inferior que con el transversal a la par que el comportamiento en cuanto a la uniformización del plano de iluminancia mejora sustancialmente con el difusor transversal. Por ello se opta por añadir el

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

---



(a) configuración básica (especular) (b) difusor longitudinal (c) difusor transversal

Figura 4.22: Comparativa planos de iluminancia con difusor en la entrada, posición 0° 60°

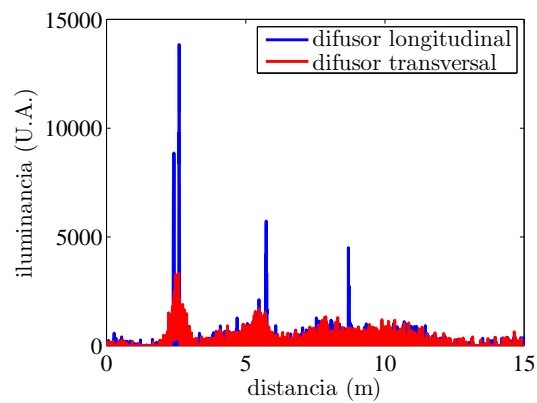


Figura 4.23: Perfil difusores horizontal y transversal

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

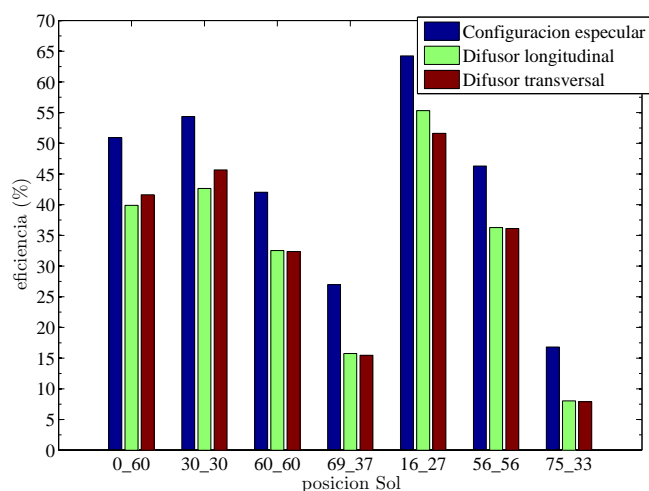


Figura 4.24: Eficiencia con difusores

difusor transversal como elemento para mejorar la uniformidad en el plano de iluminancia. Para cerrar el apartado de la mejora en la uniformidad se va a estudiar un cerramiento con vidrio rugoso situado a la salida de la luminaria, este vidrio rugoso implica unas pérdidas por reflexiones de Fresnel estimadas en el 13 % para la media de las posiciones solares. También se va a estudiar el empleo de celosías de apantallamiento de 30, 40 y 50°.

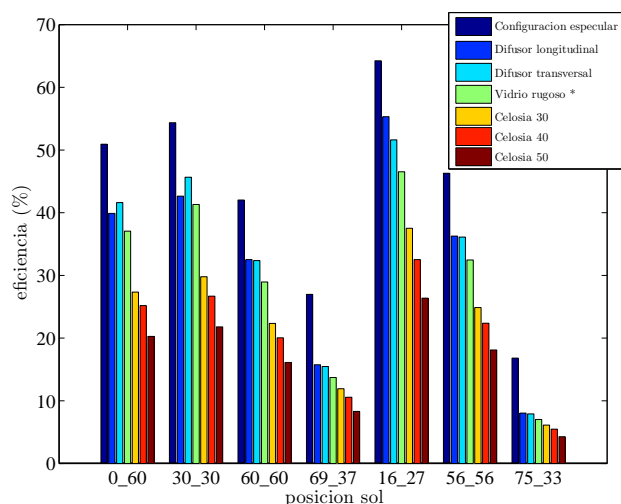


Figura 4.25: Eficiencia con sistemas estudiados

En la figura 4.25 se observan las eficiencias para todos los sistemas estudiados. La configuración básica es especular y sobre ella se decide instalar el difusor transversal. El vidrio rugoso o las celosías son aplicadas a esta configuración con difusor transversal por las ventajas que aporta. A la vista

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

de los datos de eficiencia el uso de celosías para este sistema de iluminación natural no es apto dado que hay una bajada enorme de la eficiencia. Para evaluar el funcionamiento del vidrio rugoso hay que estudiar la mejora en la uniformidad en relación a la pérdida de eficiencia. Se define la uniformidad como,

$$U = \frac{E_{med}}{E_{max}}, \quad (4.10)$$

donde  $E_{med}$  es la iluminancia media y  $E_{max}$  es la iluminancia máxima en el plano de trabajo. El plano de trabajo se define para una altura de 0.85 m y una extensión de 5 metros de ancho por 10 metros de largo. La malla de puntos en las que se realiza la medida corresponde a una matriz de 1500 x 4500 pixeles que pertenecen al plano total obtenido en el trazado de rayos.

Configuración	Especular	+dif. transversal	+dif. transv.+rugoso
0° 60°	0.01	0.06	0.1
30° 30°	0.016	0.05	0.13
60° 60°	0.056	0.25	0.34
69° 37°	0.008	0.06	0.11
16° 27°	0.021	0.08	0.12
56° 56°	0.016	0.18	0.24
75° 33°	0.006	0.08	0.13

Tabla 4.4: Uniformidad en  $10 \times 5 m^2$  para distintas configuraciones

El aumento de uniformidad debido al vidrio rugoso en un factor medio del 161 % respecto al uso únicamente del difusor transversal para todas las posiciones estudiadas aconsejan el empleo de este tipo de cerramiento en todas las luminarias. Para este mismo caso la eficiencia baja de media un 10.5 %. Debido a estos datos la configuración elegida para el sistema comprende los siguientes elementos:

- Captador TCPC
- Guía de luz especular
- Difusor transversal en la zona de entrada
- Vidrio de cierre de las luminarias rugoso
- Material de la luminaria difusor

El material empleado en la luminaria y la configuración misma de las luminarias se mantiene como secreto empresarial de la empresa Lledó iluminación por lo que no puede ser revelado. Las prestaciones de uniformidad del sistema mejoran sustancialmente al introducir vidrio rugoso, acercándose al objetivo de  $U = 0.5$ . Este parámetro es susceptible de mejora con vidrios de mayor rugosidad, manteniendo los niveles de eficiencia. De estos estudios se



## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

puede concluir que la configuración óptima reduce el problema de Hot Spots en un orden de magnitud ( $\times 10$ ), manteniendo una eficiencia del 80 % de la inicial. C

### 4.5.4. Resultado optimizado. Planos iluminancia y curvas polares

Los planos de iluminancia se presentan para la configuración elegida y las siete posiciones solares estudiadas.

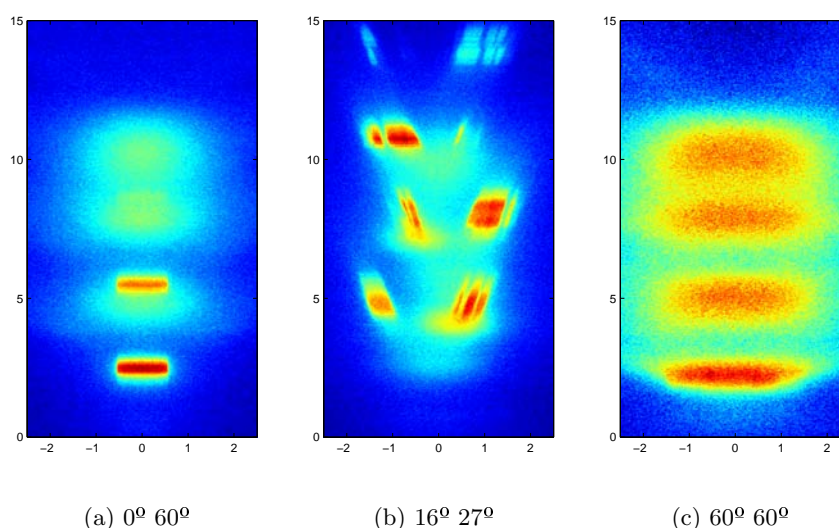
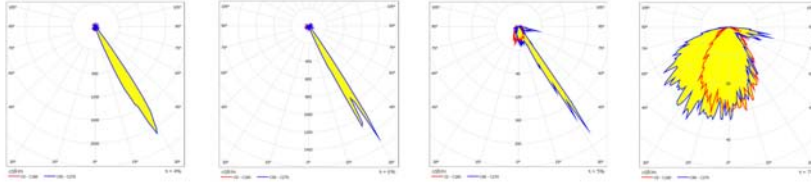


Figura 4.26: Planos de iluminancia configuración final

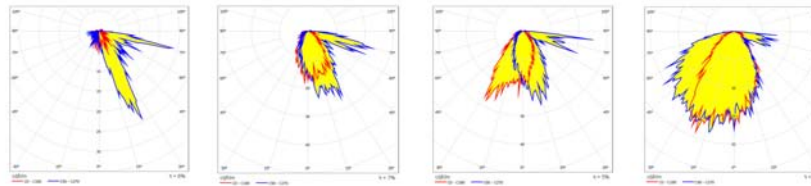
Una vez definido el sistema completo y obtenidos los planos de irradiancia en el plano de trabajo la obtención de curvas polares en formato eulumdata es necesaria. Con los archivos eulumdat (ldt) de cada luminaria para cada posición solar es posible utilizar programas de diseño para iluminación como el Dialux, Calculux, etc. Una vez caracterizadas las curvas de emisión de las luminarias solares es posible hacer el diseño de iluminación para diferentes espacios y obtener las estimaciones de iluminancia para distintos locales, en distintos planos y con distintas reflectancias de pared de una manera rápida y sencilla. En los archivos eulumdat se ha incluido un factor de trazabilidad estimado en las mediciones del prototipo así como las pérdidas por acristalamiento en el cierre de la unidad captadora, esto va a permitir obtener datos de iluminancia en luxes que serán equiparables a las medidas del sistema completo.

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo

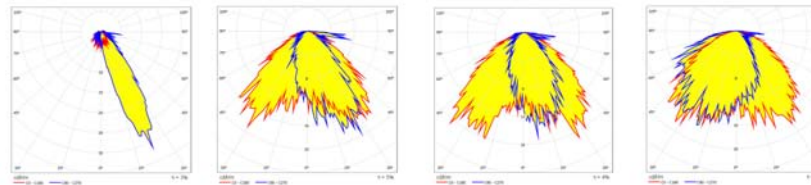
---



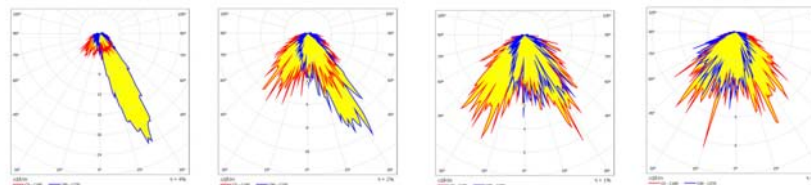
Posición 0° 60° (de izquierda a derecha luminaria 1 a 4)



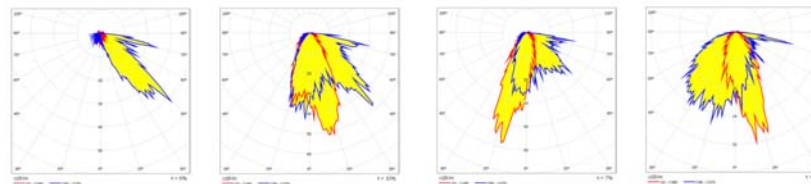
Posición 30° 30°



Posición 60° 60°



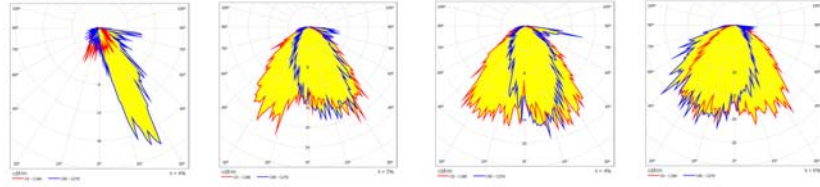
Posición 69° 37°



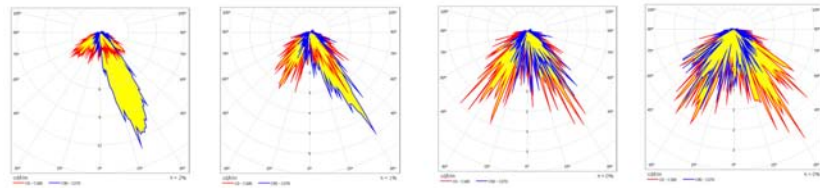
Posición 16° 27°

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---



Posición 56° 56'



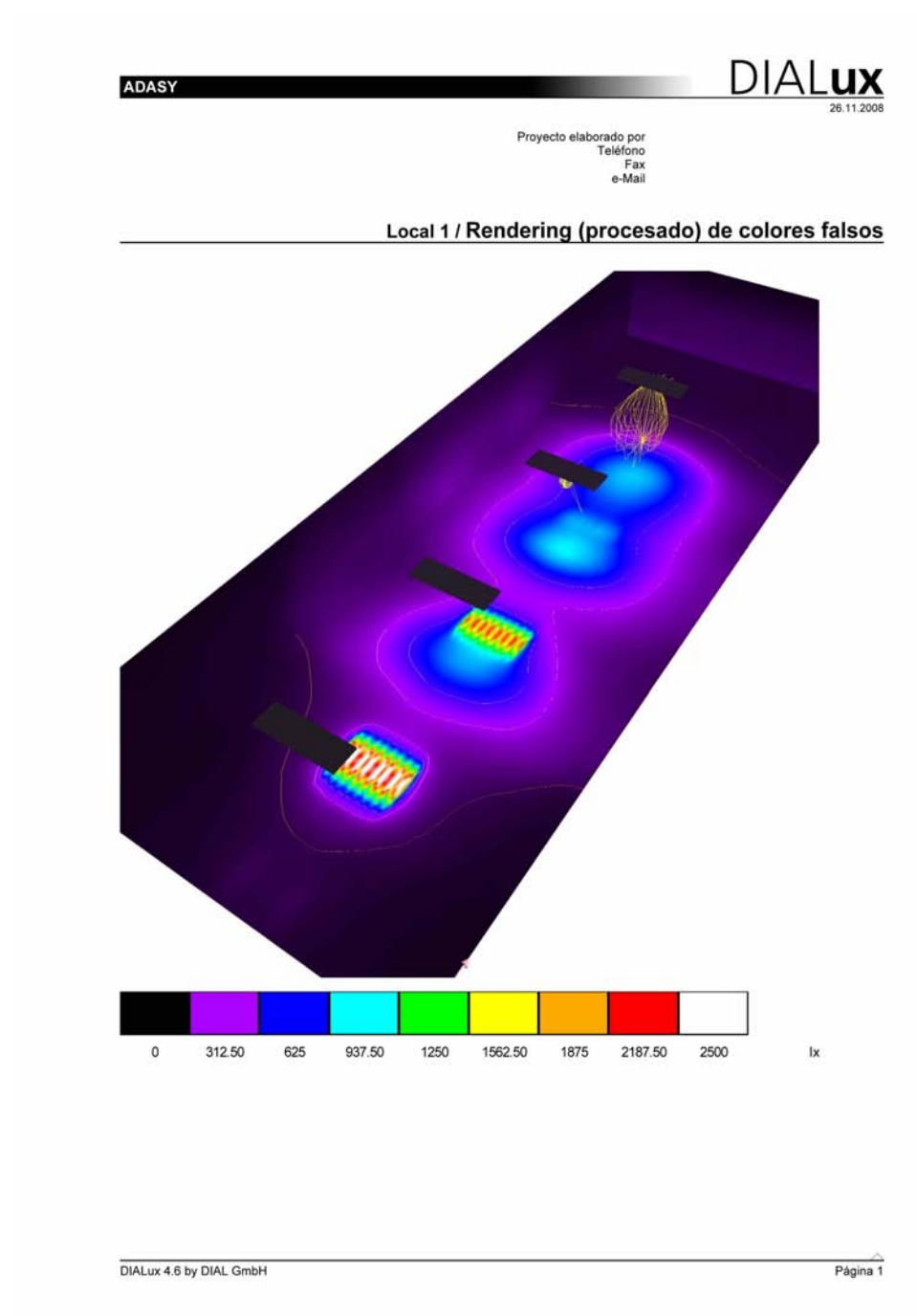
Posición 75° 33'

Tabla 4.5: Curvas polares de emisión (Eulumdat) para luminarias 1 a 4 a distintas posiciones solares

La referencia empleada para las curvas polares hace que si el colector esta situado a la izquierda el final de la guía, luminaria 4, esta situado a la derecha. Por ello la luz que sale con un ángulo hacia la derecha de la curva indica que la luz va en dirección al final de la guía.

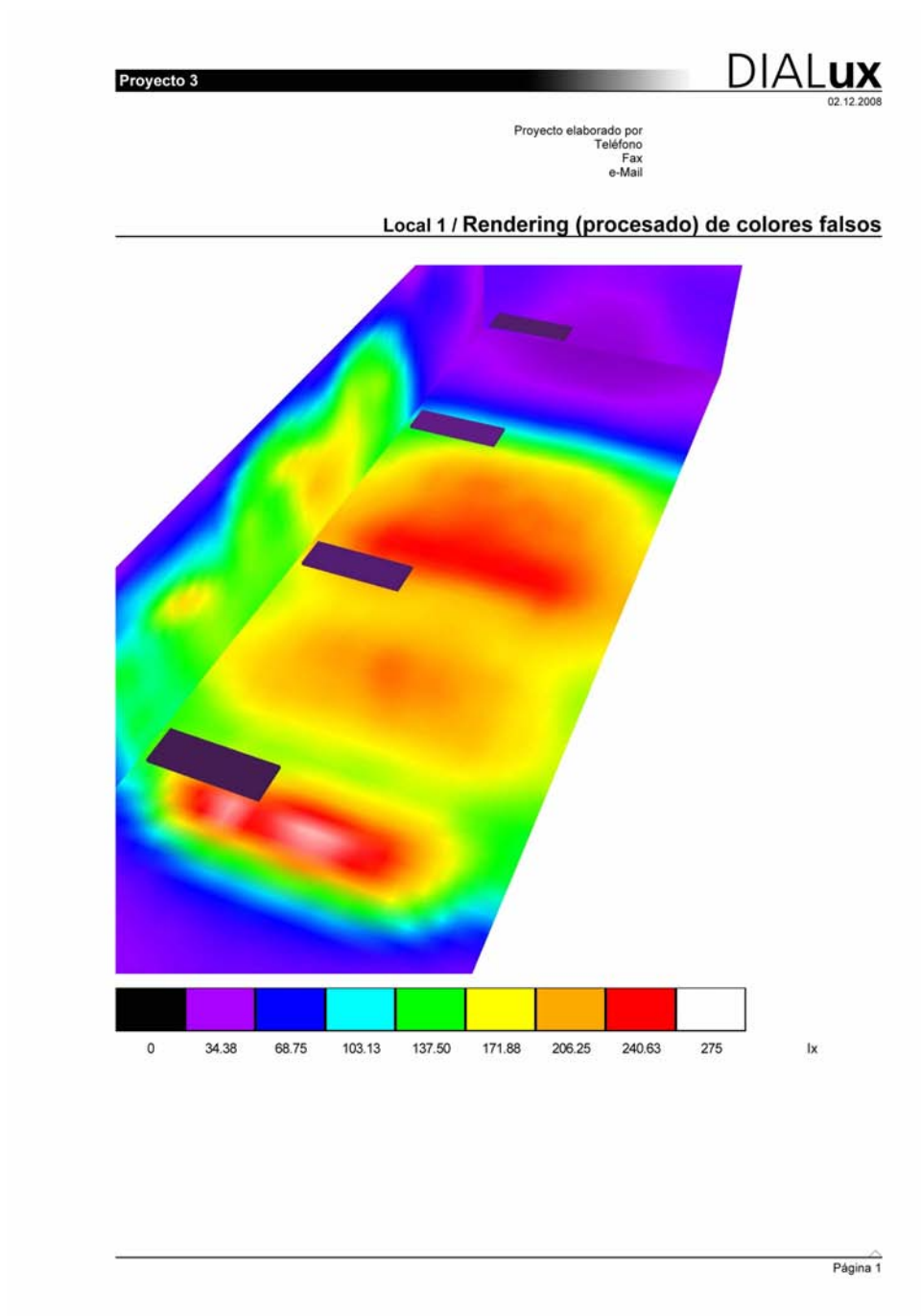
Empleando estas curvas polares se puede calcular la iluminancia obtenida en un determinado espacio, en la tabla 4.6 se ha calculado la iluminancia en un área de  $50 m^2$  mediante el software para cálculo de iluminación Dialux. Como los archivos ldt empleados son estándar es posible realizar estos cálculos en todos los paquetes de iluminación disponibles en el mercado.

#### 4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo



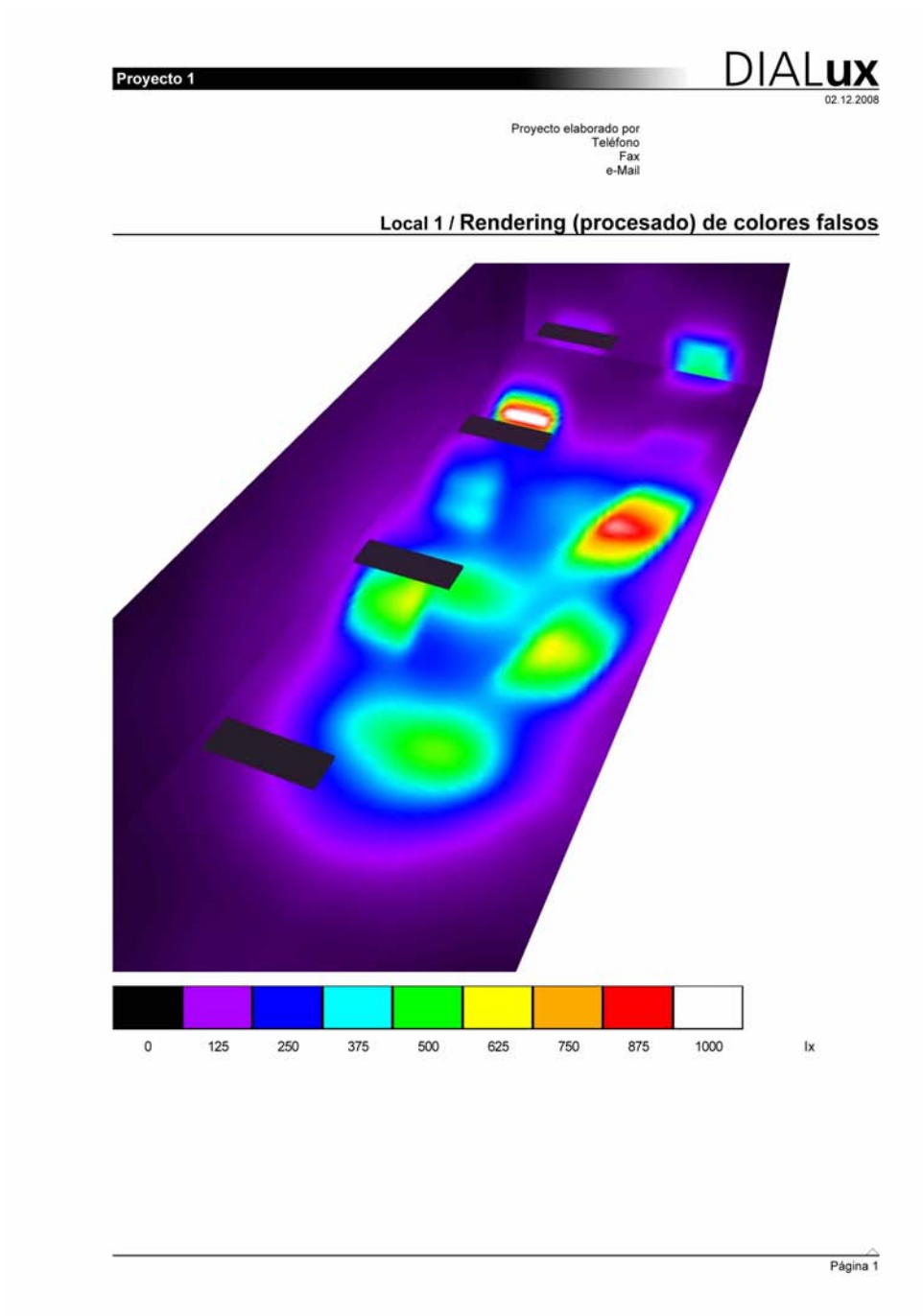
Posición 0° 60°

#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico



Posición 60° 60°

4.5 Simulación por ordenador del sistema de iluminación completo



Posición 16º 27º

Tabla 4.6: Simulación iluminancia con Dialux

## 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

### 4.6. Prototipo escalado

Para validar el sistema se realiza un prototipo escalado del mismo, en la figura 4.27 se observa con detalle el captador anidólico. Inicialmente se propuso la fabricación del prototipo a escala 1:2 pero debido a problemas en la fabricación el escalado no es lineal en todos los ejes del mismo, tabla 4.7.

Dimensiones (m)	Prototipo	Sistema real
Ancho guía	0.55	1.1
Alto guía	0.3	0.5
Largo guía	5.7	11
Distancia plano análisis	1.85	1.85
Ancho plano análisis	5	5
Largo plano análisis	9	15

Tabla 4.7: Dimensiones prototipo

#### 4.6.1. Medidas prototipo escalado y simulación

El prototipo se ha medido en las instalaciones que tiene BLL en Austria donde se dispone de simuladores de cielo. Se mide un plano de luminancias



Figura 4.27: Prototipo del colector

con una CCD calibrada para ello obteniendo un plano de luminancias. Un procesado geométrico mediante cálculo por ordenador permite pasar el plano de luminancia medido que tiene deformaciones geométricas, figura 4.28, a un plano de luminancias sin deformar. Este plano es procesado para pasarlo a planos de iluminancia, empleando un material de reflectancia Lambertiana con un parámetro  $\rho$  conocido se puede aproximar la iluminancia como:

$$E = \frac{L\pi}{\rho}, \quad (4.11)$$

donde  $L$  es la luminancia en  $cd/m^2$  y  $\rho$  es la reflectancia del material Lambertiano empleado.



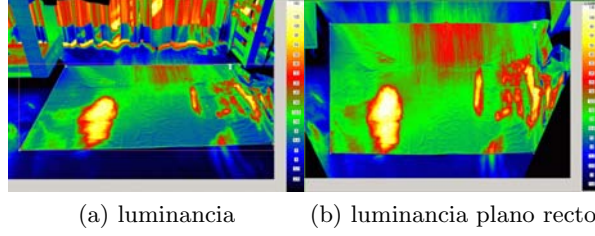


Figura 4.28: Medida experimental prototipo

Conociendo el área medida que es iluminada por el sistema de luz natural y sabiendo los niveles de iluminancia en cada punto es posible cuantificar el flujo que se obtiene para cada posición solar medida. Dado que el prototipo tiene unas medidas distintas al modelo simulado real es necesario simular de nuevo en el ordenador el prototipo con las medidas empleadas en el mismo.

Configuración	Experimental Prototipo	Simulación Prototipo
0° 60°	39.1	39
30° 30°	37	42.2
60° 60°	24.3	14.6
69° 37°	19.1	15.4
16° 27°	48.1	50.5
56° 56°	31	15.4
75° 33°	15	13.5

Tabla 4.8: Eficiencia prototipo (%), medidas experimentalmente y simuladas

Para evaluar la trazabilidad entre las medidas experimentales y las simuladas para el prototipo se define,

$$\Delta\eta = \eta_{medida} - \eta_{experimental}, \quad (4.12)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia para cada sistema de todas las luminarias.

En el histograma, figura 4.29, se observa que hay un valor que tiene mucha diferencia entre experimental y simulada pero si observamos el resto de medidas se aprecia un incremento en el número de medidas con una diferencia pequeña así como las colas típicas de una distribución gaussiana. Esto indica una aceptable trazabilidad entre las medidas experimentales y las simuladas.

Se han obtenido los planos de iluminancia en el prototipo para tres posiciones solares, 0° 60°, 30° 30° y 60° 60°. En las figuras 4.30 y 4.31 se observan, respectivamente, los planos de iluminancia experimentales y simulados para el prototipo escalado.



#### 4. Iluminación con luz natural con captador anidólico

---

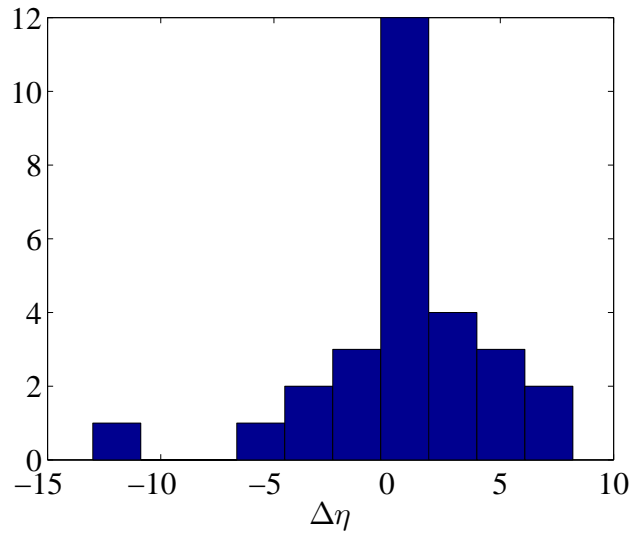


Figura 4.29: Histograma  $\Delta\eta$

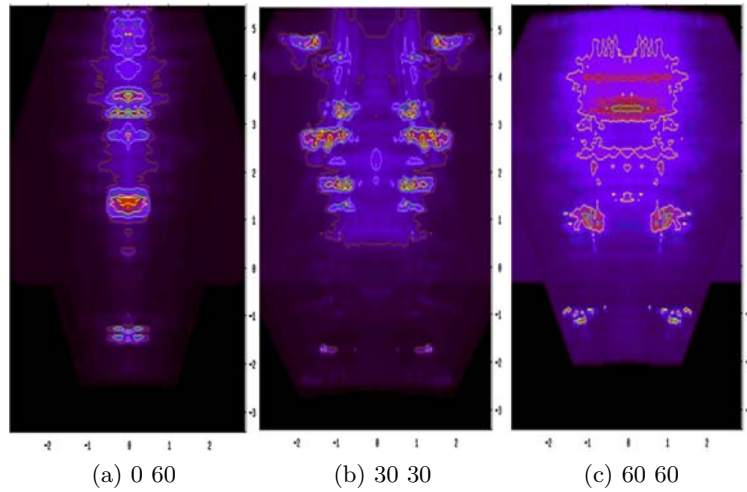


Figura 4.30: Planos de iluminancia, prototipo experimental

## 4.7 Trazabilidad simulaciones con sistema real

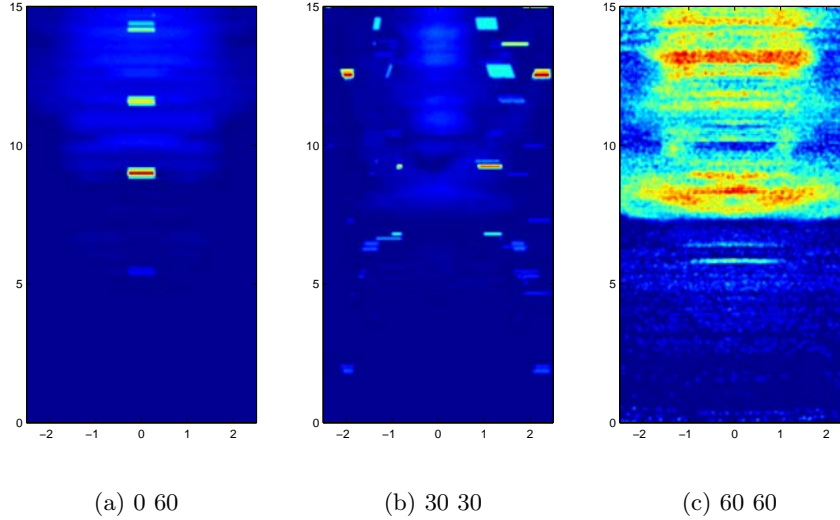


Figura 4.31: Planos de iluminancia, prototipo simulado

### 4.7. Trazabilidad simulaciones con sistema real

Para definir el comportamiento del prototipo respecto al sistema real (sistema no escalado) se va a obtener la diferencia porcentual entre ambas medidas para cada posición solar, se observa un incremento de la eficiencia para las siete posiciones solares estudiadas excepto para una en la que la diferencia es negativa, tabla 4.9. La media porcentual para todas las posiciones es del 9.4 % lo que implica que el sistema real tiene mayor eficiencia que el prototipo. Esta situación probablemente sea debida a la diferencia de esbeltez de ambas configuraciones dado que los parámetros propios que definen la reflectancia tanto de la guía, luminarias y colector se ha mantenido igual.

Configuración	Simulado	Real	Diferencia (%)
0° 60°	39	42.5	8.2
30° 30°	42.2	49.6	14.9
60° 60°	14.6	12.2	-19.7
69° 37°	15.4	21.3	27.7
16° 27°	50.5	54.2	6.8
56° 56°	15.4	18	14.4
75° 33°	13.5	15.7	13.4

Tabla 4.9: Trazabilidad prototipo simulación-real



## Capítulo 5

# Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis doctoral es el estudio, diseño y optimización de sistemas ópticos, ya sean de concentración o de iluminación, para su empleo en sistemas donde la radiación solar o artificial es necesaria. Para la realización de esta tarea se ha profundizado en el estudio teórico de concentradores de radiación mediante el método del campo de luz el cual permite el diseño de concentradores ideales <sup>1</sup> que funcionan, no sólo en dos dimensiones, sino también de manera perfecta en tres dimensiones. Ampliando el estudio teórico se presentan sistemas donde se demuestra el funcionamiento y aplicabilidad a casos reales de alto interés industrial, comercial y estratégico de algunos de los sistemas estudiados. Junto con las aportaciones científicas a revistas y congresos este trabajo ha proporcionado patentes con empresas y universidades que certifican el interés comercial de alguno de estos diseños.

Las energías renovables están siendo investigadas desde hace muchos años, muchas de ellas se emplean en la actualidad con éxito, sin embargo la iluminación con luz natural debido al bajo coste de la energía eléctrica y al elevado rendimiento de algunas fuentes de luz artificial así como la necesidad ineludible de estar solapada con la iluminación artificial hacen que el desarrollo dependa, en gran manera, de factores externos a las mismas bondades de los distintos sistemas. La labor conjunta de la óptica con otras ramas como la arquitectura y la ingeniería proporcionaría un auge mayor de estos sistemas. No obstante, el imparable incremento en el coste de las fuentes de energía habituales hoy en día unido a la ineludible necesidad de reducción en la emisión de contaminantes hacen que sean un sector que cada día toma más importancia.

---

<sup>1</sup>término teórico que indica un comportamiento óptico acorde a los parámetros de diseño

## 5. Conclusiones

---

### Conclusiones particulares

1. Se ha presentado una nueva familia de concentradores anidólicos llamados **Concentradores Elípticos (EC)** con nuevas propiedades. Los concentradores elípticos tienen dos ejes geométricos de diseño, estos dos ejes proporcionan una de las características más destacadas de este tipo de sistemas y es que tienen dos ángulos principales de aceptación. Estos ángulos son susceptibles de ser calculados y ajustados según el diseño geométrico del EC, encontrando buena concordancia, en el caso de los concentradores estudiados, entre el ángulo de diseño teórico y el calculado mediante trazado de rayos. Los concentradores de extrusión y de rotación son casos particulares de este tipo de concentradores. Teniendo en cuenta la reversibilidad de este tipo de ópticas se obtienen dos ángulos de emitancia para el caso de fuentes extensas.
2. Se ha presentado un nuevo concentrador asimétrico para fuente finita, **hiperboloide de una hoja**, obtenido mediante la teoría del campo de luz. Se ha demostrado que el hiperboloide de una hoja es un concentrador asimétrico ideal en 3D porque su forma no interfiere en las líneas de flujo de un disco elíptico que será el receptor. Este dispositivo puede ser aplicado a sistemas solares sin seguimiento donde dos ángulos de aceptación distintos, transversal y longitudinal, pueden ser útiles. Para conocer el comportamiento óptico se ha simulado mediante trazado de rayos la eficiencia del sistema, se obtienen curvas características del comportamiento ideal de sistema independientemente de la incidencia acimutal de la luz. Este comportamiento ideal es importante ya que no es obvio ni usual que un sistema óptico asimétrico sea ideal en tres dimensiones.
3. Se ha presentado una nueva familia de concentradores con geometría de orden superior para fuente infinita en tres dimensiones, **concentrador hiperparabólico (HPC)**. Su diseño se basa en la aplicación de la teoría de campo de luz para un emisor Lambertiano con forma de cono truncado. Geométricamente, el perfil del HPC esta compuesto por la unión de una hipérbola y de una parábola girada con sus focos situados en el vértice del cono. En las curvas de transmisión angular obtenidas por simulación mediante trazado de rayos se observa que el límite inferior de rendimiento es para una focal  $f = 0$  que representa la curvatura de un CPC. El límite superior se obtiene cuando la focal  $f \rightarrow \infty$ , si la reflectancia  $\rho = 1$  se observa el comportamiento de un concentrador ideal.
4. Los arrays ópticos anidados con integración espacial son sistemas que funcionan muy bien para iluminación natural ya que pueden redirigir

---

la luz que proviene de fuentes naturales hacia espacios interiores sin la necesidad de elementos activos como heliostatos. Se ha presentado una optimización de estos sistemas añadiendo un array *hijo* en la entrada del array *madre* consiguiéndose mejoras en la eficiencia que van desde un 50 %, comparado con aperturas abiertas, hasta un 400 % comparado con difusores estándar. El elemento clave de este tipo de arrays *hijo* es un elemento óptico que se ha denominado cilindro-dioptrio-axicon por su configuración óptica.

5. Se ha diseñado un sistema de lucernario mediante un CPC prismático hueco con alta eficiencia y reducido deslumbramiento, se ha realizado un prototipo de laboratorio el cual se ha analizado tanto experimentalmente como por trazado de rayos. La eficiencia medida comparada con un CPC estándar de aluminio es un 600 % mayor a 80° de incidencia solar. Como valor medio de mejora en eficiencia se obtiene un incremento del 300 % en el rango de 0 a 85°.
6. En este trabajo se ha realizado un prototipo para iluminación natural en oficinas a través de una matriz anidólica de captación diseñada exclusivamente para esa tarea y optimizada para la latitud de Madrid. Después de la captación es necesario un sistema de guiado de la radiación solar que será posteriormente distribuida por luminarias diseñadas para luz natural. Con el sistema completo es posible iluminar, con una uniformidad controlada, un área de 40 m<sup>2</sup> con un nivel medio de 400 Lux. Las ventajas que aporta el sistema no son sólo de tipo económico y ecológico sino que mejora el rendimiento y estado de ánimo de los trabajadores debido al aporte de la iluminación natural.
7. Se propone un parámetro de calidad, en este caso la eficiencia, que permite evaluar si el trazado de rayos es correcto para una óptica CPC afacetada. El tiempo de procesado de una aplicación para trazado de rayos es un parámetro importante en el diseño de sistemas ópticos. Se ha estudiado el tiempo de procesado en función del número de facetas que tiene un sistema óptico. El incremento del número de facetas mejora el parámetro de calidad pero también aumenta el tiempo de cálculo. Profundizando en este estudio sería posible optimizar la precisión para minimizar el tiempo de cálculo manteniendo la calidad de la simulación.
8. Se ha desarrollado un método de optimización inteligente automático para ópticas complejas controlado por Matlab. El programa maestro (script de Matlab) controla una aplicación de diseño 3D y el trazado de rayos. El programa maestro obtiene datos del trazado de rayos como puede ser curva polar, eficiencia, irradiancia en un plano, etc. y mediante una figura de mérito definida anteriormente y a través de un algoritmo de mínimo/máximo puede modificar los parámetros de diseño de la óptica, introducirla en la aplicación de trazado de rayos

## 5. Conclusiones

---

y recursivamente buscar la mejor óptica. Este método de optimización permite mucha flexibilidad en el diseño ya que las aplicaciones de dibujo 3D son paramétricas con lo que se pueden diseñar ópticas complejas de forma semi-automatizada.

## Apéndice A

# Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

### A.1. Programas de trazado de rayos

Hay dos tipos principales de programas de trazado de rayos, secuenciales y no secuenciales. Los programas secuenciales se emplean habitualmente para el diseño de sistemas ópticos formadores de imagen. Se deben definir superficies de forma secuencial que tendrán una interacción de forma estricta, un rayo no podrá volver y deberá viajar siempre en la misma dirección para seguir el trazado de rayos.

Los programas no secuenciales no tienen limitación en cuanto a la dirección que toma la luz, se basan en el empleo de elementos sólidos en tres dimensiones. Son mayoritariamente empleados en sistemas no formadores de imagen debido a que la luz puede seguir cualquier camino. Debido al gran número de interacciones necesarias, ya sean reflexiones o refracciones, el tiempo de cálculo es elevado. La introducción de los elementos que componen el sistema óptico es variada aunque normalmente los estándares CAD 3D más aceptados son igs, acis, stl, etc.

El trazado de rayos exacto se basa en la ley de refracción vectorial,

$$n'(\vec{R}' \times \vec{N}) = n(\vec{R} \times \vec{N}), \quad (\text{A.1})$$

donde  $n$  y  $n'$  son los índices de refracción y  $\vec{R}$  y  $\vec{R}'$  son los vectores unitarios en la dirección del rayo incidente y refractado.  $\vec{N}$  es el vector unitario normal a la superficie de incidencia. Simplificando, la evaluación de cada rayo implica la detección de incidencia con la superficie, posteriormente implica el cálculo del vector  $\vec{N}$  para operar y poder obtener  $\vec{R}'$ . Este proceso debe realizarse tantas veces como sea necesario debido a las múltiples reflexiones/refracciones que puede tener un rayo en un sistema óptico. En cada incidencia debe contabilizarse el flujo perdido para aplicarlo sucesivamente en cada iteración. Fenómenos como la difracción o la dispersión pueden ser



## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

---

tenidos en cuenta en este tipo de programas que suelen basar la modelización de los mismos en métodos estadísticos como el “Monte Carlo Ray tracing”.

### A.2. Tiempo VS precisión

Los modernos sistemas de cálculo con ordenadores multinúcleo, buses de 64 bits y memorias RAM cada vez más veloces y de mayor capacidad hacen que los tiempos de cálculo se vean reducidos notablemente. La velocidad de los ordenadores, medida en Mhz, ha subido espectacularmente en las últimas décadas. En el año 1980, para un PC, la velocidad era de 10 Mhz, en 1990 de 100 Mhz, en 2000 de 500 Mhz y en el año 2010, por ejemplo, el procesador i7-970 tiene 3.2 Ghz con 6 núcleos, es decir 3200 Mhz por núcleo que serían 19200 Mhz si la relación fuese lineal, aunque se ha demostrado [81] que esta linealidad depende del número de procesadores y del tipo de cálculo. Esta evolución es impresionante, pero aún hoy en día el tiempo de cálculo debe ser tenido en cuenta para optimizar no sólo temporalmente sino económicamente los desarrollos futuros.

#### A.2.1. Trazado de rayos en un CPC

Un CPC <sup>1</sup> puede ser hecho en 3D por revolución por ello se puede conseguir una precisión total en el sólido 3D construido. Otra forma de diseñarlo en 3D es mediante las ecuaciones paramétricas. Si diseñamos con ecuaciones paramétricas podemos obtener un CPC afacetado, figura A.1, con la precisión que sea necesaria.

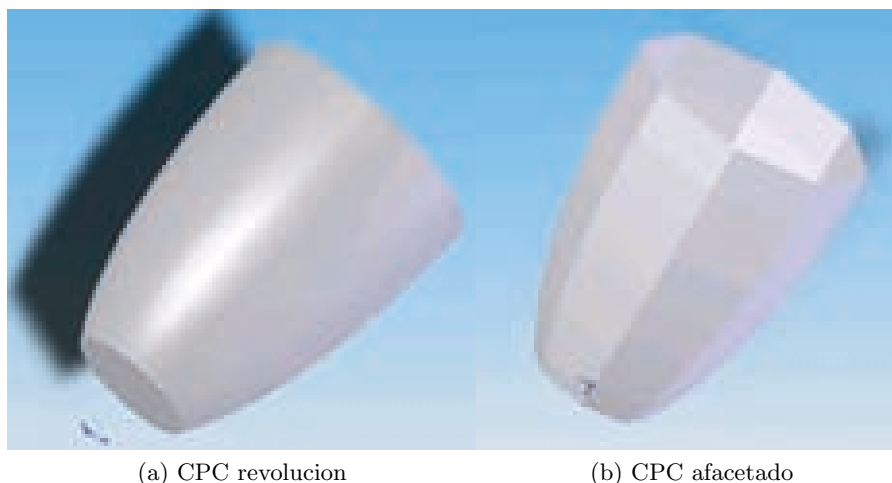


Figura A.1: Concentrador parabólico compuesto 30º 3D

Se va a comprobar el tiempo de cálculo que emplea un mismo sistema

---

<sup>1</sup>concentrador parabólico compuesto

## A.2 Tiempo VS precisión

para distintos niveles de afacetado comparando la precisión en la curva obtenida. Para ello se va a emplear una estación de trabajo HP XW6400 con procesador Xeon Core 2 y el programa de trazado de rayos TracePro 4.1, funcionando en Windows XP a 32 bits con 4 Gb de Ram.

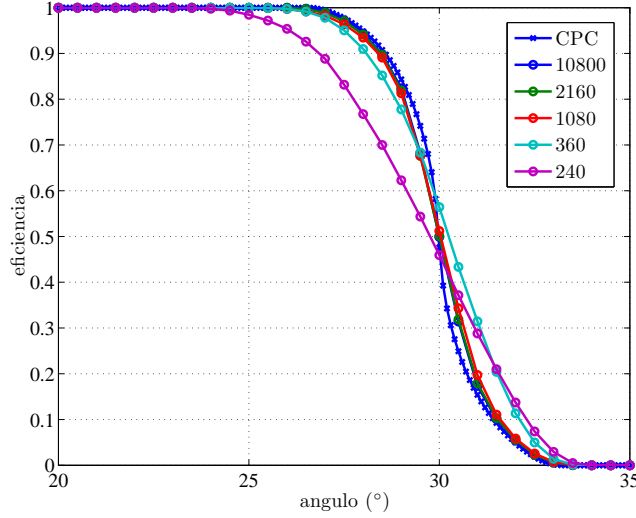


Figura A.2: Curva eficiencia CPC VS numero facetas

En la figura A.2 se puede observar que al aumentar el número de facetas la curva se aproxima a la curva del CPC de revolución. Esto implica una mayor precisión pero a la par el tiempo de cálculo va aumentando como se observa en la figura A.3. En el caso de objetos que pueden ser diseñados en 3D por el método de la revolución se puede hacer un sólido 3D con lo que la precisión y el tiempo de cálculo no serán problema. En el caso de diseñar un sistema óptico que no pueda ser hecho por revolución el compromiso entre precisión en la medida y tiempo de cálculo dependerá en gran medida de las necesidades concretas tanto del sistema como del tiempo disponible.

Un CPC es un sistema diseñado para un ángulo de aceptación concreto, en el caso estudiado el ángulo de aceptación son  $30^\circ$ . Si evaluamos la eficiencia de un CPC 3D para una incidencia de 0 a  $\theta_{max}$  tenemos un valor que nos sirve de referencia para corroborar si el CPC afacetado esta funcionando como se espera.

En la tabla se muestra el número de facetas calculado para 100000 rayos con 30 secciones en vertical, aumentando el número de facetas el parámetro de calidad se aproxima al valor ideal pero para llegar a igualarlo es necesario un aumento exponencial del número de facetas de forma que el tiempo de cálculo aumentará de igual forma.

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

---

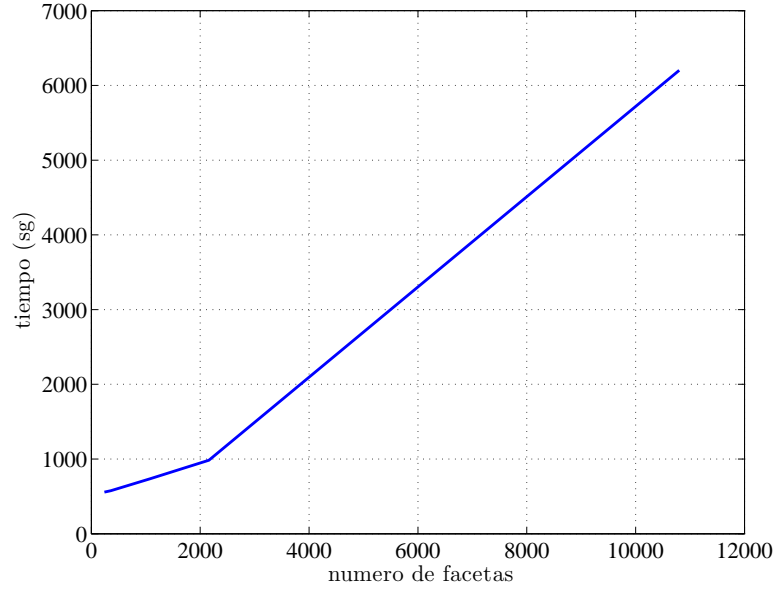


Figura A.3: Tiempo empleado de trazado de rayos

Tipo CPC	Eficiencia 0 a $\theta_{max}$	número facetas	lados poliedro
CPC revolución	0.9868	n/a	$\infty$
CPC afacetado	0.9804	10800	360
CPC afacetado	0.9802	2160	72
CPC afacetado	0.9797	1080	36
CPC afacetado	0.9797	360	12
CPC afacetado	0.9613	240	8

Tabla A.1: Parámetro calidad

### A.3. Software simulación dirigido en Matlab

Los pasos necesarios para la simulación del sistema afacetado comprenden:

- Cálculo nube de puntos que comprenden un CPC
- Transformación de esa nube de puntos a facetas en un archivo stl
- Inicio de TracePro con inserción de stl y propiedades de reflectancia
- Ejecución de una macro en TracePro para obtención de planos de irradiancia angular
- Procesado de los planos para obtener eficiencia

Debido a lo iterativo del proceso ya que son 5 CPCs afacetados con un trazado cada uno de 20 a 35<sup>o</sup> en pasos de 0.5<sup>o</sup> y su posterior evaluación implica 5x30x5=750 pasos. Para automatizar este proceso nos basamos en la herramienta Matlab que va a generar los archivos 3D necesarios así como ejecutar y dar las órdenes necesarias de forma automática a TracePro para que realice el trazado de rayos.

En el diagrama de flujos de la figura [A.4](#) se observa el proceso de la programación en los que se distingue en verde la actuación de Matlab y en azul el funcionamiento del programa de trazado de rayos. Los programas o macros empleados son: calculoCPCinicio.m, función CPCfacetasprograma.m, función surf2stl.m, macro TracePro giroGRIDfacetasSALIDA.scm y finalmente procesadodatos.m.

Manejar con Matlab todo el proceso permite dejar todo el proceso sin intervención humana, además cerrando TracePro con Matlab se consigue liberar la memoria totalmente quedando la RAM vacía. Esto mejora notablemente la velocidad del trazado de rayos y mitiga en gran medida posibles errores que suelen aparecer en cierto momento debido a desbordamientos de memoria. En las siguientes listas se muestran, por este orden, los programas empleados para esta simulación:

- calculoCPCinicio.m
- CPCfacetasprograma.m
- surf2stl.m
- variables.scm
- giroGRIDfacetasSALIDA.scm
- inserta.scm

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

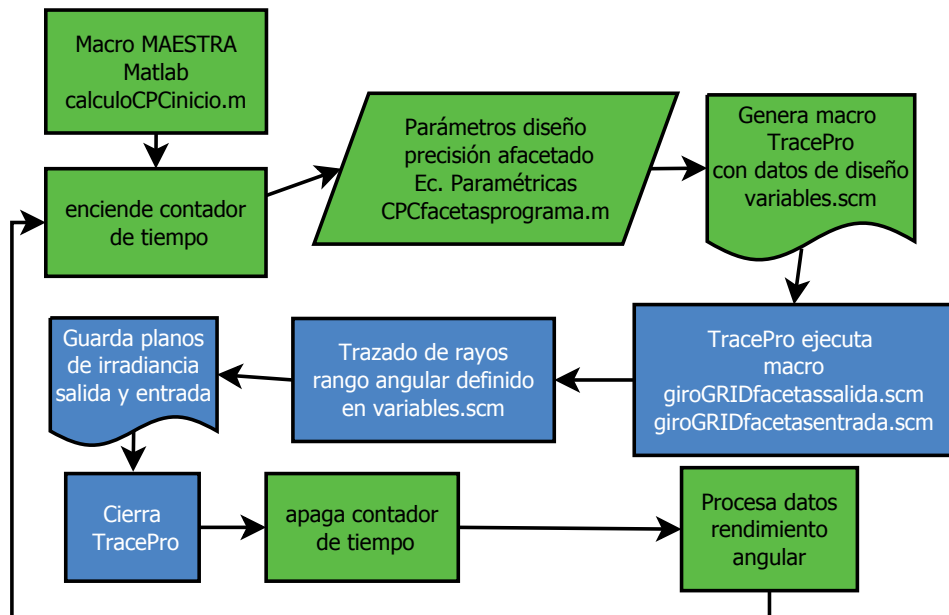


Figura A.4: Diagrama de flujos simulación CPC afacetado, verde Matlab, azul TracePro

### Programa A.1: script calculoCPCInicio.m

```

1  %% Script maestro que crea CPC afacetado y crea macro de
   TracePro con la que
2  % inicia el proceso de trazado de rayos.
3  % Ejecuta archivos para calculo CPC afacetado
4  % Usa también inserta.scm, giroGRIDfacetasENTRADA.scm,
5  % giroGRIDfacetasSALIDA.scm
6  % Antonio Alvarez Fernandez Balbuena 2010
7
8
9  global angulofacetas puntosvertical anguloCPC rayos
10 for angulofacetas=[1,5,10,30,45] % ángulos a procesar
11 tic
12 %% Parámetros
13 puntosvertical=15
14 anguloCPC=30
15 rayos=2000
16 anguloinicio=19.5
17 paso=0.5
18 repeticiones=32
19 angulo=0;
20 %% Calculamos STL
21 CPCfacetasprograma(angulofacetas,puntosvertical,anguloCPC) %
   ángulo facetas rotación, puntos en vertical y ángulo CPC
22
23 %Generamos una macro de variables
24 load('ladosprisma.txt')
25 load('ap.txt')
26 load('CPCfacetas.txt')
  
```

### A.3 Software simulación dirigido en Matlab

```

27 posicionX=CPCfacetas(1,1) % posicion eje z grid
28 diametroGRID=CPCfacetas(1,2) % diametro del GRID
29 posicionX=posicionX+.01;
30 girosalida=360/(ladosprisma*2);
31 a=CPCfacetas(1,2);
32 h=CPCfacetas(1,1); %longitud CPC
33
34 ruta='D:\\usuarios\\antonio\\universidad\\facetastracepro\\';
35 file=strcat(ruta,'variables.scm');
36 fid = fopen(file,'w+'); %w+
37 fprintf(fid,'(define rootPath "D:/usuarios/antonio/universidad/
   facetastracepro/") \n');
38 %Los valores de R1 R2 y Escala son los argumentos de entrada de
   la función
39 fprintf(fid,'(define angulofacetas %g) \n',angulofacetas);
40 fprintf(fid,'(define puntosvertical %g) \n',puntosvertical);
41 fprintf(fid,'(define anguloCPC %g) \n',anguloCPC);
42 fprintf(fid,'(define rayos %g) \n',rayos);
43 %fprintf(fid,'(print rayos %g) \n');
44 fprintf(fid,'(define ap %g) \n',ap);
45 fprintf(fid,'(define ladosprisma %g) \n',ladosprisma);
46 fprintf(fid,'(define girosalida %g) \n',girosalida);
47 fprintf(fid,'(define h %g) \n',h);
48 fprintf(fid,'(define posicionX %g) \n',posicionX);
49 fprintf(fid,'(define anguloinicio %g) \n',anguloinicio);
50 fprintf(fid,'(define a %g) \n',a);
51 fprintf(fid,'(define paso %g) \n',paso);
52 fprintf(fid,'(define repeticiones %g) \n',repeticiones);
53 fprintf(fid,'(define angulo %g) \n',angulo);
54
55 fprintf(fid,'(define diametroGRID %g)',diametroGRID);
56
57
58 %fprintf(fid,'(file:close-all)');
59 fclose(fid);
60
61 %% Cargamos macro de trazado de rayos en TracePRO
62 !"C:\Archivos de programa\Lambda Research Corporation\TracePro\
   TracePro.exe" "D:/usuarios/antonio/universidad/
   facetastracepro/giroGRIDfacetasSALIDA.scm"
63 tiempo=toc
64
65 nombre=strcat(num2str(angulofacetas),'-',num2str(puntosvertical
   ),'-',num2str(anguloCPC),'-',num2str(rayos),'-tiempo.txt')
66 fid = fopen(nombre,'w+'); %w+
67 fprintf(fid,'%g',tiempo);
68 fclose(fid);
69 end

```

En la siguiente figura se muestra la precisión empleada para el octaedro calculado por la macro CPCfacetasprograma.

Programa A.2: script CPCfacetasprograma.m

```

1 function [a]=CPCfacetas(Δtheta,resolucionZ,anguloCPC)

```

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

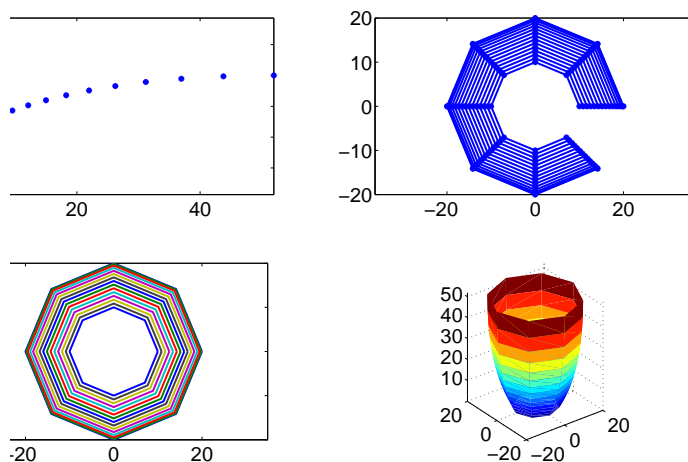


Figura A.5: CPC afacetado 8 lados diseñado por CPCfacetasprograma

```

2
3 % datos: CPCfacetas( $\Delta$ theta,resolucionZ,anguloCPC), grados de
   giro entre facetas y puntos en eje z (altura)
4
5 close all
6
7 % elipse y cpc EL CPC lo mueve a traves del eje a, el mas largo
   ...
8 %   Input parameters:
9 %       a           Value of the major axis
10 %       b           Value of the minor axis
11
12 % bucle con a variables y z tambien
13 % Dibuja un CPC con ecuaciones parametricas
14
15 save girosalida.txt  $\Delta$ theta -ascii
16 %limpia
17 counter=0;
18
19 thetamax=anguloCPC;
20 grados=thetamax; %para usarlo sin pasarlo a radianes
21 thetamax=thetamax*pi/180;
22
23 ap=10; %ap es aprima y es el radio de la salida pequeña del CPC
   ...
24
25 f=ap*(1+sin(thetamax)); %focal
26
27
28 % Para calcular el angulo fi maximo
29 a=ap/sin(thetamax);
30
31 Lcpc=(a+ap)*cot(thetamax) %Longitud del CPC
32 alfa=(a+ap)/Lcpc

```

### A.3 Software simulación dirigido en Matlab

```
33 alfa=atan(alfa);
34 alfa=alfa*180/pi
35
36 total=(90+grados)-(alfa+grados)
37 %resolucionZ=10 %número de puntos en z
38 numero=total/(resolucionZ-1); % para que sean los puntos
    decididos
39
40     for fi=alfa+grados:numero:(90+grados)
41         fi
42         counter=counter+1;
43         fi=fi*pi/180;
44         y(counter)=(2*f*sin(fi-thetamax))/(1-cos(fi))-ap
45         z(counter)=(2*f*cos(fi-thetamax))/(1-cos(fi));
46
47     end
48
49
50 subplot(2,2,1),plot(z,y,'*')
51 axis equal
52 hold on
53
54 z=z';
55 y=y';
56 datos=[z,y];
57 save CPCfacetas.txt datos -ascii
58
59
60 %%%%%%%%%%%
61 % Aquí es para hacer el STL
62 %%%%%%%%%%%
63
64 datos=load('CPCfacetas.txt'); % carga el fichero con z e y del
    CPC para construir la elipse...
65 % elipse y cpc EL CPC lo mueve a traves del eje b, el mas corto
    ...x
66
67
68 % Input parameters:
69 %     a          Value of the major axis
70 %     b          Value of the minor axis
71
72 % bucle con a variables y z tambien
73
74 sss=1;
75 matriz=zeros(3,730); %tres posiciones para xyz
76
77     for f=1:length(datos) %1
78
79         b=datos(f,2) %coge el valor de y
80         foci=0 % Foco de la elipse
81         %foci=sqrt(a^2-b^2) %c^2=a^2-b^2
82         c=foci;
83         acalculado=sqrt(b^2+c^2) %calcula b manteniendo el foco
            constante...
```



## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

```
84         a=acalculado
85
86
87         phi=0; %rotacion de la elipse respecto al eje.
88         x0=0; % desplazamiento en coordenadas.
89         y0=0; % desplazamiento en coordenadas.
90
91         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
92         %Delta theta=30; % en grados
93         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
94
95     %         dgrados=Delta theta; %lo guarda en grados para operar.
96     %         numeropuntos=(360-dgrados)/Delta theta+1;
97     theta = [0:Delta theta:(360)-Delta theta];
98     %         Delta theta=Delta theta*pi/180;
99     %         theta=theta.*(pi/180);
100
101     % Parametric equation of the ellipse
102     %-----
103     x = a*cosd(theta);
104     y = b*sind(theta);
105
106     % Coordinate transform
107     %-----
108     X = cosd(phi)*x - sind(phi)*y;
109     Y = sind(phi)*x + cosd(phi)*y;
110     X = X + x0;
111     Y= Y + y0;
112
113     % Plot the ellipse
114     %-----
115     subplot(2,2,2),plot(X,Y,'b-*');
116     hold on
117     axis equal;
118
119     % Construimos una superficie para pasarlo a stl
120     %-----
121     D=length(X');
122     XX(1:D,f)=X';
123     YY(1:D,f)=Y';
124     ZZ(1:D,f)=(ones(size(X)).*datos(f,1))';
125     XX(D+1,f)=XX(1,f);
126     YY(D+1,f)=YY(1,f);
127     ZZ(D+1,f)=datos(f,1);
128
129     end
130
131 subplot(2,2,3),plot(XX,YY)
132 subplot(2,2,4),surf(XX,YY,ZZ), shading flat
133
134 surf2stl('CPCfacetas.stl',XX,YY,ZZ)
135
136 % % stl de la salida.
137 % n2=length(x);
138 % z2=zeros(n2,n2);
```

### A.3 Software simulación dirigido en Matlab

```
139 % surf2stl('CPCexit.stl',x,y,z2)
140
141 save ladosprisma.txt D -ascii
142 save ap.txt ap -ascii
143 end
```

Programa A.3: script surf2stl.m

```
1 function surf2stl(filename,x,y,z,mode)
2 %SURF2STL Write STL file from surface data.
3 % SURF2STL('filename',X,Y,Z) writes a stereolithography (STL)
4 % file
5 % for a surface with geometry defined by three matrix
6 % arguments, X, Y
7 % and Z. X, Y and Z must be two-dimensional arrays with the
8 % same size.
9 %
10 % SURF2STL('filename',x,y,Z), uses two vector arguments
11 % replacing
12 % the first two matrix arguments, which must have length(x) =
13 % n and
14 % length(y) = m where [m,n] = size(Z). Note that x
15 % corresponds to
16 % the columns of Z and y corresponds to the rows.
17 %
18 % SURF2STL('filename',dx,dy,Z) uses scalar values of dx and
19 % dy to
20 % specify the x and y spacing between grid points.
21 %
22 % SURF2STL(...,'mode') may be used to specify the output
23 % format.
24 %
25 % 'binary' - writes in STL binary format (default)
26 % 'ascii' - writes in STL ASCII format
27 %
28 % Example:
29 %
30 % surf2stl('test.stl',1,1,peaks);
31 %
32 % See also SURF.
33 %
34 % Author: Bill McDonald, 02-20-04
35
36 error(nargchk(4,5,nargin));
37
38 if (ischar(filename)==0)
39     error('Invalid filename');
40 end
41
42 if (nargin < 5)
43     mode = 'binary';
44 elseif (strcmp(mode,'ascii')==0)
45     mode = 'binary';
46 end
```

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

---

```
39
40 if (ndims(z) ≠ 2)
41     error( 'Variable z must be a 2-dimensional array' );
42 end
43
44 if any( (size(x)≠size(z)) | (size(y)≠size(z)) )
45
46     % size of x or y does not match size of z
47
48     if ( (length(x)==1) & (length(y)==1) )
49         % Must be specifying dx and dy, so make vectors
50         dx = x;
51         dy = y;
52         x = ((1:size(z,2))-1)*dx;
53         y = ((1:size(z,1))-1)*dy;
54     end
55
56     if ( (length(x)==size(z,2)) & (length(y)==size(z,1)) )
57         % Must be specifying vectors
58         xvec=x;
59         yvec=y;
60         [x,y]=meshgrid(xvec,yvec);
61     else
62         error('Unable to resolve x and y variables');
63     end
64
65 end
66
67 if strcmp(mode,'ascii')
68     % Open for writing in ascii mode
69     fid = fopen(filename,'w');
70 else
71     % Open for writing in binary mode
72     fid = fopen(filename,'wb+');
73 end
74
75 if (fid == -1)
76     error( sprintf('Unable to write to %s',filename) );
77 end
78
79 title_str = sprintf('Created by surf2stl.m %s',datestr(now));
80
81 if strcmp(mode,'ascii')
82     fprintf(fid,'solid %s\r\n',title_str);
83 else
84     str = sprintf('%-80s',title_str);
85     fwrite(fid,str,'uchar'); % Title
86     fwrite(fid,0,'int32'); % Number of facets, zero
87     for now
88
89 end
90 nfacets = 0;
91
92 for i=1:(size(z,1)-1)
93     for j=1:(size(z,2)-1)
```

### A.3 Software simulación dirigido en Matlab

```
93
94     p1 = [x(i,j)      y(i,j)      z(i,j)];
95     p2 = [x(i,j+1)    y(i,j+1)    z(i,j+1)];
96     p3 = [x(i+1,j+1)  y(i+1,j+1)  z(i+1,j+1)];
97     val = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode);
98     nfacets = nfacets + val;
99
100     p1 = [x(i+1,j+1)  y(i+1,j+1)  z(i+1,j+1)];
101     p2 = [x(i+1,j)    y(i+1,j)    z(i+1,j)];
102     p3 = [x(i,j)      y(i,j)      z(i,j)];
103     val = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode);
104     nfacets = nfacets + val;
105
106     end
107 end
108
109 if strcmp(mode,'ascii')
110     fprintf(fid,'endsolid %s\r\n',title_str);
111 else
112     fseek(fid,0,'bof');
113     fseek(fid,80,'bof');
114     fwrite(fid,nfacets,'int32');
115 end
116
117 fclose(fid);
118
119 disp( sprintf('Wrote %d facets',nfacets) );
120
121
122
123 % Local subfunctions
124
125 function num = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode)
126
127 if any( isnan(p1) | isnan(p2) | isnan(p3) )
128     num = 0;
129     return;
130 else
131     num = 1;
132     n = local_find_normal(p1,p2,p3);
133
134     if strcmp(mode,'ascii')
135
136         fprintf(fid,'facet normal %.7E %.7E %.7E\r\n', n(1),n
137             (2),n(3) );
138         fprintf(fid,'outer loop\r\n');
139         fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p1);
140         fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p2);
141         fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p3);
142         fprintf(fid,'endloop\r\n');
143         fprintf(fid,'endfacet\r\n');
144     else
145
146         fwrite(fid,n,'float32');
```

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

---

```
147         fwrite(fid,p1,'float32');
148         fwrite(fid,p2,'float32');
149         fwrite(fid,p3,'float32');
150         fwrite(fid,0,'int16');    % unused
151
152     end
153
154 end
155
156
157 function n = local_findnormal(p1,p2,p3)
158
159 v1 = p2-p1;
160 v2 = p3-p1;
161 v3 = cross(v1,v2);
162 n = v3 ./ sqrt(sum(v3.*v3));
```

### Programa A.4: script variables.scm

```
1 (define rootPath "D:/usuarios/antonio/universidad/
   facetastracepro/")
2 (define angulofacetas 45)
3 (define puntosvertical 15)
4 (define anguloCPC 30)
5 (define rayos 2000)
6 (define ap 10)
7 (define ladosprisma 8)
8 (define girosalida 22.5)
9 (define h 51.9615)
10 (define posicionX 51.9715)
11 (define anguloinicio 19.5)
12 (define a 20)
13 (define paso 0.5)
14 (define repeticiones 32)
15 (define angulo 0)
16 (define diametroGRID 20)
```

### Programa A.5: script giroGRIDfacetasSALIDA.scm

```
1 ; Hace un barrido angular en diametro usando un grid
2
3 ; cargamos variables e insertamos CPC
4 (load "variables.scm")
5 (load "inserta.scm")
6
7 ; detalles posicion GRID
8 (raytrace:set-grid-origin (position 0 0 posicionX))
9 (raytrace:set-grid-boundary-annular diametroGRID)
10 (raytrace:set-grid-pattern-random rayos 1)
11
12
13 (raytrace:set-simulation-prompt-off)
14
```

### A.3 Software simulación dirigido en Matlab

```
15 (analysis:set-display-rays #f)
16
17 (set! anguloinicio (+ anguloinicio 180)) ; hay que sumarle 270
    por la configuracion...
18
19
20
21 ; *****
22 ; bucle que barre
23
24 (do ((vec)
25      (j 0 (+ j 1)))
26      ((= j repeticiones) vec)
27      (set! angulo (- anguloinicio 180))
28      (print angulo)
29
30
31 ;parametros del grid
32
33
34 (raytrace:set-grid-orientation-euler-degrees (gvector 180 0 0))
35 (raytrace:set-beam-orientation-euler-degrees (gvector
    anguloinicio 0 0))
36 (raytrace:grid)
37
38
39
40
41
42
43 ; selecciona superficie salida
44 (edit:select (tools:face-in-body 0 (entity 2)))
45 (analysis:irradiance)
46 (analysis:irradiance-ray-type "incident")
47 (analysis:irradiance-save (string-append "medidas/"(number
    ->string angulofacetas)"-" (number->string
    puntosvertical)"-" (number->string anguloCPC)"-" (
    number->string rayos)"-salida-" (number->string angulo)
    ".bmp"))
48 (analysis:irradiance-save (string-append "medidas/"(number
    ->string angulofacetas)"-" (number->string
    puntosvertical)"-" (number->string anguloCPC)"-" (
    number->string rayos)"-salida-" (number->string angulo)
    ".txt"))
49 (analysis:irradiance-close)
50
51
52
53 ; añade el paso al angulo de inicio
54
55 (set! anguloinicio (+ anguloinicio paso))
56
57
58 )
59
```

## A. Tiempo de cálculo, simulaciones y precisión

---

```
60 ; Fin bucle medida salida
61 ; *****
62
63 ; Cargo macro para calcular la salida antes renuevo las
    variables de trabajo
64
65 (load "variables.scm")
66 (load "giroGRIDfacetasENTRADA.scm")
67
68 ; Cierro TracePRO
69 (file:close-all)
70 (file:exit)
```

### Programa A.6: script inserta.scm

```
1 (insert:part "CPCfacetas.stl")
2 '(edit:clear-selection)
3 '(edit:add-selection (entity 1))
4 (property:apply-surface (entity 1) (list "Perfect Mirror" "
    Default")
5   (gvector 0 0 0) (gvector 0 0 0)
6   (position 0 0 0) (gvector 0 0 0) #t)
7
8 ; meto superficie salida
9 (solid:prism 0.001 ap ap ladosprisma)
10 (entity:rotate (entity 2) 0 0 0 0 0 1 girosalida)
11
12 ; meto superficie entrada
13 (solid:prism 0.001 a a ladosprisma)
14 (entity:rotate (entity 3) 0 0 0 0 0 1 girosalida)
15 (entity:move (entity 3) 0 0 h)
```

## Apéndice B

# Optimización inteligente de sistemas ópticos

En el transcurso de este trabajo se ha visto la necesidad de automatización de muchos de los procesos que implican el desarrollo de sistemas ópticos. Entre ellos la propia geometría del sistema óptico en muchos casos no necesita optimización debido a que la teoría demuestra con claridad el funcionamiento ideal como se ha visto a lo largo de varios capítulos. Sin embargo hay casos concretos donde la optimización juega un papel importante, ya que incrementos pequeños en eficiencia o uniformidad pueden suponer una gran mejora. El empleo de algoritmos va a permitir la búsqueda de mínimos que generalmente serán locales. La evaluación de diferentes semillas o el empleo de algoritmos de optimización global van a permitir llegar a un mínimo adecuado. El empleo de algoritmos automatizados mejora los resultados reduciendo el tiempo de procesado.

### B.1. Parámetros de optimización

Las aplicaciones de trazado de rayos traen “toolbox” de optimización pero son bastante limitadas. En el campo de la óptica y concretamente de la iluminación hay que optimizar teniendo en cuenta muchos parámetros entre los que se debe destacar:

- a. Curva polar de emisión
- b. Eficiencia
- c. Uniformidad
- d. Etc.

Estos parámetros nunca trabajan solos y muchas veces es imprescindible diseñar una función de mérito lo suficientemente compleja que permita dar



## B. Optimización inteligente de sistemas ópticos

---

cabida a todos ellos con su correspondiente peso, de tal manera que la función de mérito podría ser:

$$f(\text{parametros}) = A \sum (r_{\text{objetivo}}^i - r_{\text{simulado}}^i)^2 + B\tau + \dots + C\mu \quad (\text{B.1})$$

donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son pesos a y tener en cuenta en la optimización, el primer término es la diferencia entre un objetivo de curva polar y el conseguido, el término  $\tau$  corresponde a la eficiencia del sistema y el término  $\mu$  a la uniformidad del mismo. En esta función de mérito tendrían cabida tantos parámetros como fuesen de utilidad al sistema.

### B.2. Control de aplicaciones

Para simplificar y automatizar la tarea se va a crear un programa maestro que funciona en Matlab. El programa maestro (script de Matlab) controla una aplicación de diseño 3D y también controla el programa de trazado de rayos como se observa en el digrama de flujos de la figura B.1. El script maestro obtiene datos del programa de trazado de rayos como puede ser curva polar, eficiencia, irradiancia en un plano, etc. y mediante una figura de mérito definida anteriormente y a través de un algoritmo de mínimo/máximo puede modificar los parámetros de diseño de la óptica, introducirla en la aplicación de trazado de rayos y recursivamente buscar la óptica mejor. Este método de optimización permite mucha flexibilidad en el diseño ya que las aplicaciones de diseño 3D paramétricas son muy flexibles ya que el cambio de una cota automáticamente modifica las cotas necesarias para mantener las condiciones de diseño establecidas.

### B.3. Ejemplo. Evaluación discreta del flujo vs. curvatura de una lente

Se va a proceder a la evaluación de un sistema óptico simple como es una lente plano convexa. En la figura B.2 se observa la lente y las cotas que la definen donde  $R1 = \infty$  es el radio de la primera superficie y  $R2$  es el radio de la segunda superficie que será variable.

La evaluación va a consistir en, manteniendo el radio plano fijo, variar el radio posterior,  $R2$  de la lente de 40 a 90 mm en pasos de 1 mm y obtener el flujo que llega a cada detector calculando posteriormente la eficiencia del sistema. Tenemos dos detectores situados a 120 mm de la superficie plana de la lente. Hay un detector de 1x1 mm y otro de 2x2 mm. La lente recibe luz perfectamente colimada con una longitud de onda de 546.1 nm, tiene un diámetro de 50 mm, el índice de refracción del material es de 1.59102 para esa longitud de onda sin coeficiente de absorción pero sí con reflexiones de Fresnel en sus superficies.

### B.3 Evaluación discreta del flujo vs. curvatura de una lente

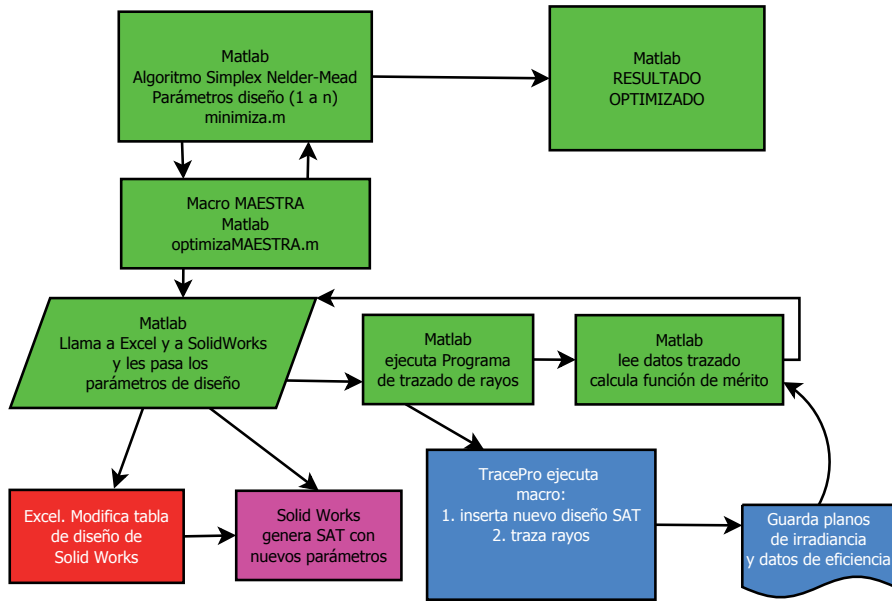


Figura B.1: Diagrama de flujo de la optimización, verde Matlab, azul TracePro, rojo Excel y rosa SolidWorks

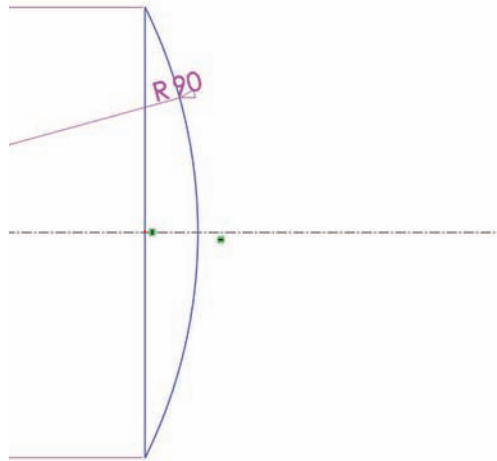


Figura B.2: Cotas lente

En la figura B.3 se observa la curva de eficiencia para cada tamaño de detector, en este caso tan sencillo es manifiesto el máximo de eficiencia pero es curioso que este máximo se desplaza según el tamaño del detector. En el detector de 1x1 mm el máximo corresponde a un radio de curvatura de la lente de 68 mm mientras que el máximo para el detector 2x2 mm corresponde a un radio de 72 mm de la lente.

## B. Optimización inteligente de sistemas ópticos

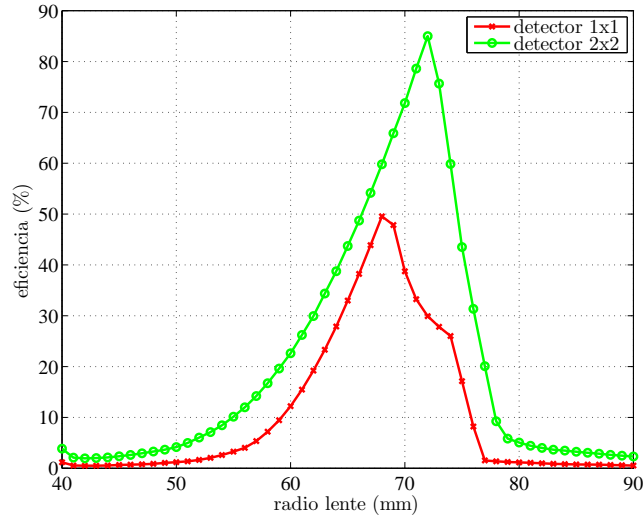


Figura B.3: Eficiencia VS radio lente

En la figura B.4 y B.5 se observan los planos de irradiancia para el mismo detector de 1x1 mm pero para dos radios de lente distintos. Curiosamente el que produce el máximo de eficiencia no corresponde al punto más focalizado. Esto hace que dependiendo de la finalidad del sistema óptico ya sea concentrador o iluminador se debe tener en cuenta que pequeñas variaciones en una cota, en este caso 3 mm, conlleva pasar de una eficiencia del 49.5 % a una eficiencia del 33.9 %.

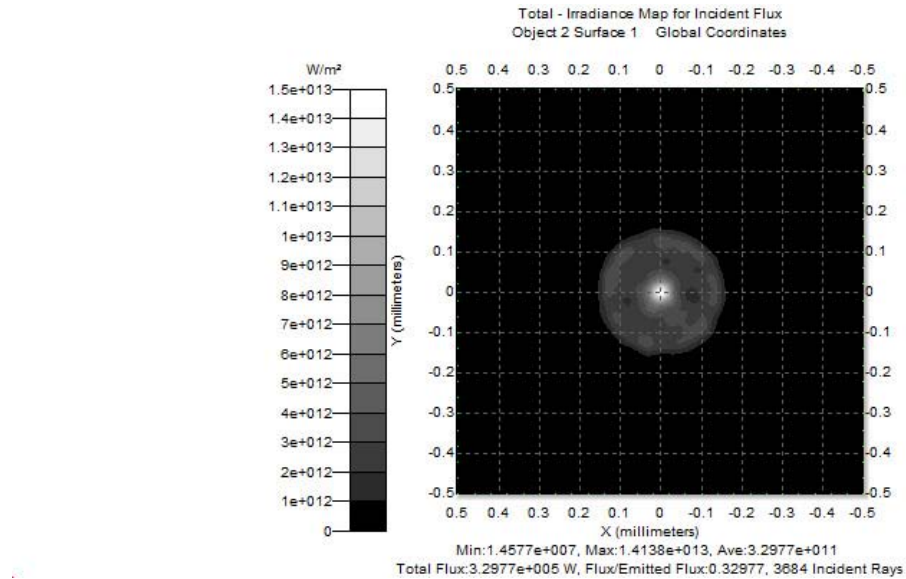


Figura B.4: Mapa irradiancia detector 1x1, radio lente 65 mm

## B.4 Optimización Nelder-Mead curvatura lente 1 variable

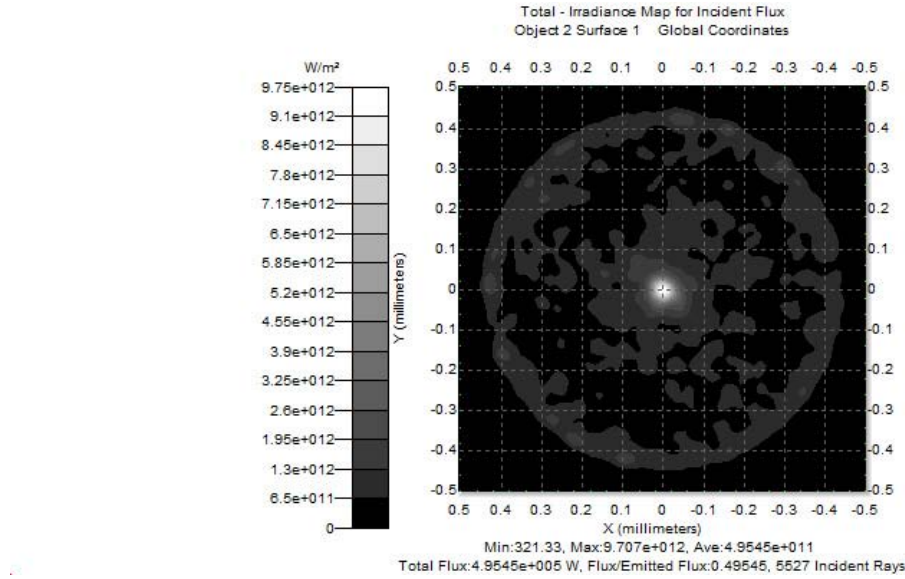


Figura B.5: Mapa irradiancia detector 1x1, radio lente 68 mm

### B.4. Ejemplo. Optimización Nelder-Mead curvatura lente 1 variable

Los datos obtenidos en el apartado anterior son obtenidos al variar el radio  $R2$  en pasos de 1 mm. En este apartado se va a obtener el radio más óptimo para obtener el mayor flujo empleando el algoritmo Simplex Nelder-Mead [82, 83]. Para ello se define la función a minimizar como:

$$f(\text{radio}R2) = \Phi_{\text{salida}} - \Phi_{\text{detector}}, \quad (\text{B.2})$$

donde  $f(\text{radio}R2)$  es la función que va a emplear el algoritmo Nelder-Mead para minimizar. Cuanto más baja es esta función mayor flujo hay en el detector. En el siguiente script de Matlab se muestra la función de minimización, `fminsearch(@optimizaMAESTRA,45)` con los parámetros que se observan en el script que llama a su vez a la función `optimizaMAESTRA.m` que es la que se encarga de dirigir los procesos descritos en B.1.

Programa B.1: script para 1 variable minimiza.m

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Función de minimización-optimización
3  % Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena 2010
4  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
6  limpia
7  global canal
8  tic
9

```

## B. Optimización inteligente de sistemas ópticos

```
10 % Conecta matlab con TracePro no esta abierta la conexión
11 !"C:\Program Files\Lambda Research Corporation\TracePro70\
    TracePro70.exe" &
12 pause(5)
13 canal = ddeinit('TracePro','scheme');
14
15 % Función de minimización Nelder Mead
16 fminsearch(@optimizaMAESTRA,45,optimset('MaxIter',40,'TolFun',1
    e-3,'Display','iter','Tolx',1e-3,'PlotFcns','optimplotfval'
    ))
17
18 % cierra TracePro
19 ddeexec(canal,'(file:close-all)');
20 ddeexec(canal,'(file:exit)'); % ejecuta comando tracepro
21 clear canal % borro variable canal de conexión
22 tiempo=toc/60;
23 msgbox(strcat(num2str(tiempo),' minutos'),'Optimización
    finalizada','help');
```

Ejecutando el script minimiza se obtiene que  $R2 = 68.5009$  y  $R2 = 72.1228$  para el detector 1x1 y el 2x2 respectivamente.

Resultado dado por Matlab para minimiza.m (detector 1x1):

Iteration	Func-count	min f(x)	Procedure
0	1	993650	
1	2	992167	initial simplex
2	4	984473	expand
3	6	853925	expand
4	8	591326	reflect
5	10	591326	contract inside
6	12	532807	contract inside
7	14	487593	contract inside
8	16	487593	contract inside
9	18	485149	contract inside
10	20	479448	contract inside
11	22	479448	contract inside
12	24	479267	contract outside
13	26	479131	contract inside
14	28	478974	contract inside
15	30	478974	contract inside
16	32	478974	contract inside
17	34	478961	contract inside
18	37	478961	shrink
19	39	478961	contract inside
20	41	478961	contract inside
21	43	478957	reflect
22	45	478957	contract inside

Optimization terminated:

## B.4 Optimización Nelder-Mead curvatura lente 1 variable

the current x satisfies the termination criteria using  
 OPTIONS.TolX of 1.000000e-003  
 and F(X) satisfies the convergence criteria using  
 OPTIONS.TolFun of 1.000000e-003  
 RadioR2 es:  
 ans = 68.5096

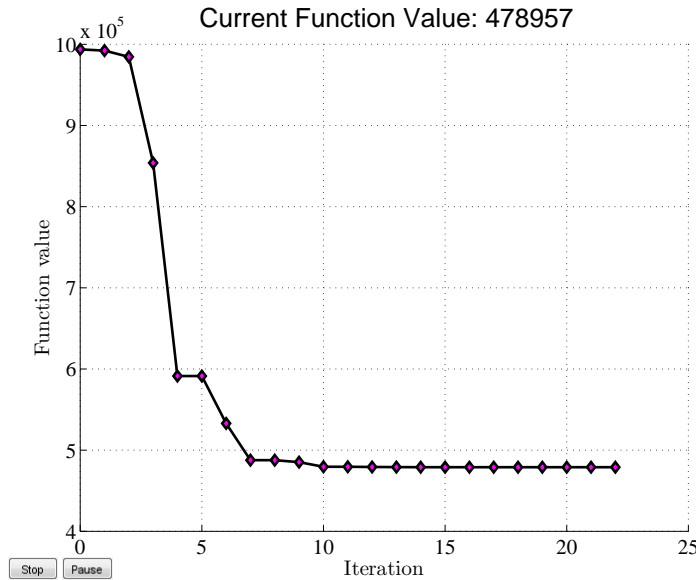


Figura B.6: Minimización función de mérito para detector 1x1

En la figura B.6 se observa como baja la función de mérito en cada iteración del algoritmo Simplex, se observa claramente que con 10 iteraciones, partiendo de un  $R2 = 45 \text{ mm}$ , se obtiene el mínimo de la función y con ello el máximo flujo en el detector. A modo de resumen se van a comparar los resultados de evaluar el radio de forma discreta en pasos de 1 mm a evaluar el flujo de manera inteligente con el algoritmo propuesto:

Optimización	detector 1x1		detector 2x2	
	R2 (mm)	Eficiencia (%)	R2 (mm)	Eficiencia (%)
Manual	68	49.545	72	84.989
Algoritmo	68.5096	52.104	72.1228	85.355
Incremento flujo	n/a	4.91 %	n/a	0.42 %

Tabla B.1: Relación eficiencias para cálculo manual y con algoritmo Simplex

En la tabla B.1 se observa que el empleo de algoritmos en este caso sencillo esta incrementando el flujo obtenido en el detector casi un 5 % para el caso del detector de tamaño 1x1. Esto es un dato significativo, aparte de la reducción del tiempo de cálculo en un 60 % debido a que no hay que pasar por todos los puntos como en el caso de la evaluación discreta.

### B.5. Ejemplo. Optimización Nelder-Mead curva- tura lente 2 variables

En el apartado anterior se ha optimizado para 1 variable, es decir sólo se ha permitido la variación de un radio de la lente. Como la lente tiene dos radios es posible optimizar con estas dos variables.

$$f(\text{radio}R1, \text{radio}R2) = \Phi_{\text{salida}} - \Phi_{\text{detector}}, \quad (\text{B.3})$$

donde  $R1$  es el primer radio de la lente y  $R2$  es el segundo radio -más cercano al detector-. En este caso la lente es biconvexa aunque los radios se han tratado como positivos por temas de manejo del programa de diseño 3D para una comprensión habitual del diseñador óptico uno de ellos debiera ser negativo para seguir las convenciones habituales. Ejecutando la función de minimización para un mínimo de  $R1$  y de  $R2$  de 45 mm y un máximo para ambos de 2000 mm. El vector  $X0$  de comienzo es 50 para ambos radios.

```
% Función de minimización Nelder Mead
LB=[45,45]; % mínimo de R1 R2
UB=[2000,2000]; % máximo de R1 R2
vectorX0=[50,50];
```

Iteration	Func-count	min f(x)	Procedure
0	1	999641	
1	3	999101	initial simplex
2	5	658493	expand
3	6	658493	reflect
4	8	658493	contract outside
5	10	658493	contract inside
6	12	658493	contract outside
7	14	591398	contract outside
8	16	376912	contract outside
9	18	101472	contract inside
10	20	101448	contract outside
11	22	101448	contract inside
12	24	101448	contract inside
13	26	101442	reflect
14	28	101438	reflect
15	30	101438	contract inside
16	32	101438	contract inside
17	34	101434	expand
18	36	101428	expand
19	38	101425	reflect
20	40	101424	reflect
21	42	101419	expand
22	43	101419	reflect

## B.5 Optimización Nelder-Mead curvatura lente 2 variables

23	44	101419	reflect
24	46	101419	contract inside
25	48	101419	contract inside
26	50	101417	reflect
27	52	101417	contract inside
28	54	101417	contract outside
29	56	101416	expand
30	58	101416	contract inside
31	59	101416	reflect
32	61	101416	reflect
33	63	101416	contract inside
34	64	101416	reflect
35	66	101416	contract inside
36	68	101416	contract inside
37	70	101415	reflect
38	72	101415	contract inside
39	73	101415	reflect
40	75	101415	contract outside

ans =  
R1 96.6342  
R2 343.0999  
Para detector 1x1

En la figura B.7 se observa la distribución de los radios hecha por el algoritmo Nelder-Mead durante la optimización con el objetivo de encontrar la pareja  $R1, R2$  que proporcione mayor flujo en el detector.

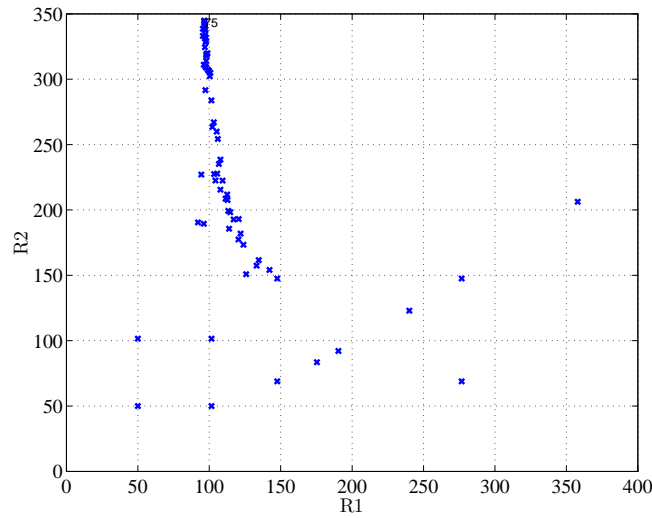


Figura B.7: Distribución de radios en minimización detector 1x1



## B. Optimización inteligente de sistemas ópticos

Como se observa en la tabla B.2 el uso de dos variables mejora la eficiencia en el detector 1x1 en un 72.46 %. Para el caso del detector 2x2 el incremento de flujo es menor aunque significativo.

	detector 1x1	detector 2x2
Optimización	Eficiencia (%)	Eficiencia (%)
Algoritmo 1 variable	52.104	85.535
Algoritmo 2 variables	89.858	89.859
Incremento flujo	72.46 %	5.05 %

Tabla B.2: Relación eficiencias con algoritmo Simplex 1 y 2 variables

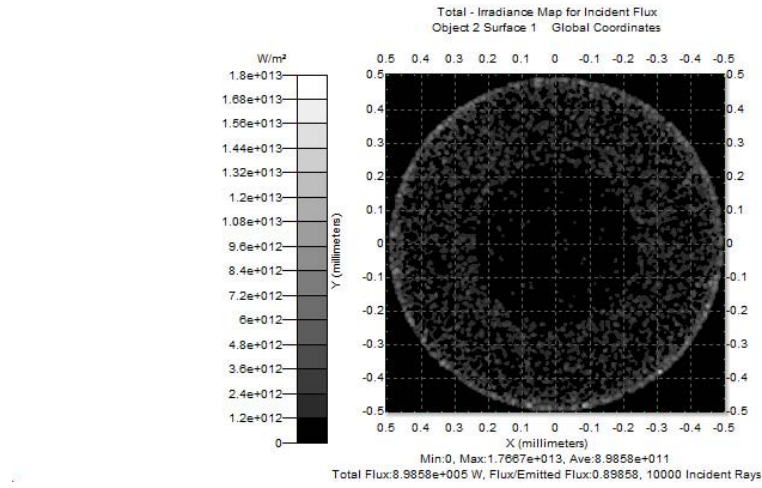


Figura B.8: Irradiancia detector 1x1 para mejor eficiencia

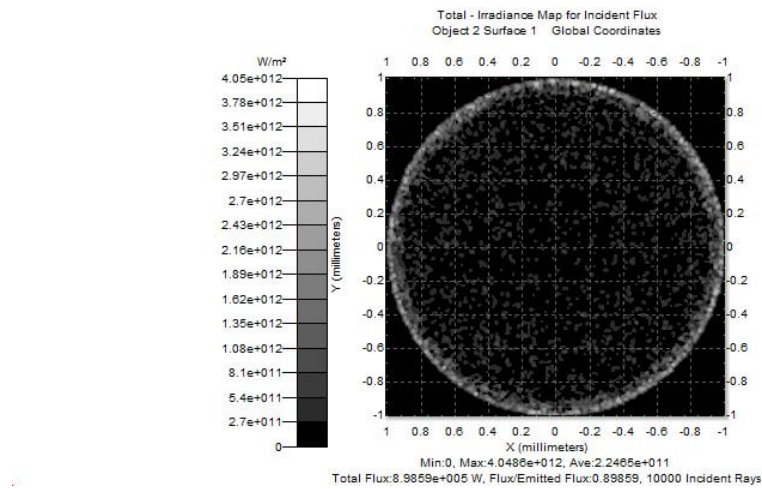


Figura B.9: Irradiancia detector 2x2 para mejor eficiencia

## B.5 Optimización Nelder-Mead curvatura lente 2 variables

Se observa en las figuras B.8 y B.9 que están llegando 10000 rayos al detector en ambos casos que son los rayos que se están trazando, esto indica que se ha optimizado perfectamente pero que debido a las reflexiones de Fresnel, que son inevitables, el flujo final nunca puede ser del 100 %.

Programa B.2: script para 1 variable optimizaMAESTRA.m

```
1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Macro maestra de optimización TracePro + SW + Matlab
3  % Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena 2010
4  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
6
7  function [flujooptimiza]=optimiza(R2)
8  global canal
9
10 % Camino de trabajo
11 path='D:/Universidad/Investigacion/optimizacion/maestra lente
    fminsearch R2/';
12
13 % lee parámetros excel y escribe nuevo dato de radio lente
14
15 [radiolente,radiolenteTXT]=xlsread('sw\lente.xlsx','Hoja1','F3'
    );
16 radiolentenuuevo=R2;
17 SUCCESS = xlswrite('sw\lente.xlsx',radiolentenuuevo,'Hoja1','F3'
    );
18
19 % Abre SW+Esfera0, guarda SAT y cierra SW
20 comandoSW=strcat('!C:\Program Files\SolidWorks Corp\SolidWorks
    \SLDWORKS.exe" /m " ', path, '\SW\LENTEgeneraSATycierraSW.
    swp" &');
21 eval(comandoSW); % Ejecuta orden SW
22 pause(45) % Da tiempo a SW a generar el SAT. Hay que ser
    generoso. Trataré de comprobar el SAT.
23
24 % envía comandos a TracePro
25 ddeexec(canal,'(file:new)'); % ejecuta TP abre archivo en
    blanco
26 comandoTP=strcat('(insert:part "', path, 'SW/lente.SAT)'); %
    inserta SAT
27 ddeexec(canal,comandoTP); % ejecuta comando tracepro
28 ddeexec(canal,'(edit:rotate (entity 1) 0 0 0 1 0 -90 #f))');
    % rota lente ya que esta girada en SW
29 ddeexec(canal,'(property:apply-material (entity 1) "Plastic" "
    Polycarb" (gvector 0 0 0))'); % aplico material
30
31 ejecutamacro1=strcat('(load "',path,'TP/insertaDETECTOR.scm)')
    ;
32 ddeexec(canal,ejecutamacro1); % ejecuta comando tracepro
33
34 ejecutamacro2=strcat('(load "',path,'TP/trazaRAYOS.scm)');
35 ddeexec(canal,ejecutamacro2); % ejecuta comando tracepro
36
```

## B. Optimización inteligente de sistemas ópticos

---

```
37 ejecutamacro3=strcat('(load "',path,'TP/seleccionaDETECTOR.scm
    "')');
38 ddeexec(canal,ejecutamacro3); % ejecuta comando tracepro
39
40 ejecutamacro4=strcat('(load "',path,'TP/guardaMAPA.scm")');
41
42 % Obtiene flujo total del mapa de irradiancia en valor numérico
43
44 flujo = ddereq(canal,'(analysis:get-current-irradiance-total-
    flux)');
45 flujooptimiza=1e6-flujo; % esto es para que el mínimo
    corresponda al máximo al minimizar.
46 ddeexec(canal,ejecutamacro4); % ejecuta comando tracepro
47
48 % cierro archivo tracepro
49 pause(5) % para que de tiempo a cerrarse TracePro
50 ddeexec(canal,'(file:close-all)');
```

# Publicaciones generadas:

## Artículos

- [50] FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINI, D.; ALDA, J. y BERNABEU, E.: «Improved spatial integrator with axicon-dioptic elements». *Optical Engineering*, 2006, **45**, p. 073002.
- [28] GARCIA-BOTELLA, A.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A. y BERNABEU, E.: «Elliptical concentrators». *Applied Optics*, 2006, **45(29)**, pp. 7622–7627.
- [41] GARCÍA-BOTELLA, A.; FERNÁNDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ, D.; BERNABEU, E. y GONZÁLEZ-CANO, A.: «Hyperparabolic concentrators». *Applied Optics*, 2009, **48(4)**, pp. 712–715.
- [39] GARCIA-BOTELLA, A.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINI, D. y BERNABEU, E.: «Ideal 3D asymmetric concentrator». *Solar Energy*, 2009, **83(1)**, pp. 113–117.
- [5] GARCIA-BOTELLA, A.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINI, D. y BERNABEU, E.: «Thermal influences on optical properties of light-emitting diodes: a semiempirical model». *Applied Optics*, 2001, **40(4)**.
- [51] VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; BERNABEU, E. y ALDA, J.: «Louvers design for LED displays for sunny days». *Displays*, 2007, **28(4-5)**, pp. 167–173.
- [45] VÁZQUEZ-MOLINI, D.; GONZALEZ-MONTES, M.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A. y BERNABEU, E.: «High-efficiency light-emitting diode collimator». *Optical Engineering*, 2010, **49(12)**, p. 3001. ISSN 0091-3286.



# Publicaciones generadas:

## Congresos

- [1] BELLONI, P.; VAZQUEZ-MOLINI, D.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A. y BERNABEU, E.: «A new method for designing, improving, and measuring hollow light guides». En: *Proceedings of SPIE*, volumen 7103, p. 710306. SPIE Europe Optical Systems Design, Glasgow, 2008.
- [53] FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; GARCIA-FERNANDEZ, B. y BERNABEU, E.: «Antiglare Traffic Signal by Natural Lighting». En: *Colour and light in architecture*, pp. 453–458. University IUAV of Venice, Italy. ISBN 978-88-96370-04-9, 2010.
- [59] FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; GARCIA-FERNANDEZ, B.; GARCIA-BOTELLA, A. y BERNABEU, E.: «Skylight: a hollow prismatic CPC». En: *Proceedings of SPIE*, volumen 7423-27, p. 74230T. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.
- [4] GARCÍA BOTELLA, A.; GARCÍA, L.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; BERNABEU, E. y POHL, W.: «Proyecto ADASY® (Active Daylighting System), Eureka n° 3575». *XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES)*, 2008.
- [43] GARCIA-BOTELLA, A.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; BERNABEU, E. y GONZALEZ-CANO, A.: «Field method for concentrator design». En: *Proceedings of SPIE*, volumen 7423-5. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.
- [79] VAZQUEZ-MOLINÍ, D.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; ZOIDO, J.; BERNABEU, E. y GARCIA-BOTELLA, A.: «Desplazamiento Cromático en guías de luz para iluminación natural». *VIII Congreso Nacional de Color Madrid*, 2007.
- [58] VAZQUEZ-MOLINI, D.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; GARCIA-BOTELLA, A. y BERNABEU, E.: «High efficiency 90° elbow for light guides». En: *Proceedings of SPIE*, volumen 7059-27, p. 70590S. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2008.

## PUBLICACIONES GENERADAS: CONGRESOS

---

- [66] VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; GONZÁLEZ MONTES, M.; GARCIA-BOTELLA, A.; GARCÍA, L.; BERNABEU, E. y POHL, W.: «Guiding daylight into a building for energy-saving illumination». En: *SPIE Newsroom*, DOI: 10.1117/2.1200911.1825, San Diego, 2009.
- [65] VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; GONZÁLEZ MONTES, M.; FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.; BERNABEU, E.; GARCIA-BOTELLA, A.; GARCÍA, L. y POHL, W.: «Active Daylighting System (ADASY)». En: *Proceedings of SPIE*, volumen 7410-2, p. 74100H. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.

## Publicaciones generadas: Patentes de invención

- [42] GARCÍA-BOTELLA, A. y FERNÁNDEZ-BALBUENA, A. A.: «Patente: Concentrador de Radiación Hiperbólico Parabólico». *OEPM*, 2008, (**Solicitud P200802876**).
- [54] ROJO SASTRE, J. J.; VÁZQUEZ-MOLINÍ, D. y FERNANDEZ-BALBUENA, A. A.: «Panel matricial de señalización vial». *OEPM*, 2001, (**Solicitud ES 2188425**).
- [57] VÁZQUEZ-MOLINÍ, D.; GARCÍA-BOTELLA, A.; FERNÁNDEZ-BALBUENA, A. A.; GARCÍA, L. y POLH, W.: «Patente: Dispositivo pasivo de captación y/o redirección de radiación solar para su conducción». *OEPM*, 2008, (**Solicitud P200801668**).





# Bibliografía

- [1] J. F. Kreider and F. Kreith. Solar energy handbook. *McGraw-Hill series in modern structures (USA)*, 1981.
- [2] W. Knorr. The Geometry of Burning-Mirrors in Antiquity. *Isis*, 74(1):53–73, 1983.
- [3] A. E. Becquerel. Mémoire sur les effets électriques produits sous influence des rayons solaires. *Comptes Rendus*, 9:561–567, 1839.
- [4] C. E. Fritts. A new form of selenium cell. *Am. J. Sci*, 26:465–472, 1883.
- [5] R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez. *Nonimaging Optics*. Elsevier Academic Press, NewYork, 2005.
- [6] R. Winston and W. T. Welford. Ideal flux concentrators as shapes that do not disturb the geometrical vector flux field: A new derivation of the compound parabolic concentrator. *Journal of the Optical Society of America*, 69(4):536, 1979.
- [7] H. Ries and Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A*, 19(3):590–595, 2002.
- [8] J. M. Gordon and Ries H. Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for fresnel reflectors. *Appl. Opt.*, 32(13):2243–2251, 1993.
- [9] H. Ries and A. Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics. *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(10):2627–2632, 1994.
- [10] *Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4)*. Ministerio de industria, turismo y comercio / IDAE, 2007.
- [11] P. Achard and R. Gicquel. *European passive solar handbook*. 1986.
- [12] J. M<sup>a</sup>. Fernández Salgado. *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*. AMV Ediciones Mundi-Prensa, 2008.
- [13] T. P. Hough. *Trends in solar energy research*. Nova Science Pub Inc, 2006.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [14] M. Šúri, T. A. Huld, E. D. Dunlop, and H. A. Ossenbrink. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10):1295–1305, 2007.
- [15] Satel-Light. <http://www.satel-light.com/>, 2009.
- [16] H. Hinterberger and R. Winston. Efficient Light Coupler for Threshold Čerenkov Counters. *Review of Scientific Instruments*, 30:1094–1095, 1966.
- [17] R. Winston. Light collection within the framework of geometrical optics. *J. Opt. Soc. Am.*, 60(2):245–247, 1970.
- [18] J. H. Lambert. *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. sumptibus Viduae Eberhardi Klett, typis Christophori Petri Detleffsen, 1760.
- [19] P. Bouguer. *Essai d’optique sur la gradation de la lumière*. 1729.
- [20] R. Winston and W. T. Welford. The geometrical vector flux and some new nonimaging concentrators. *J. Opt. Soc. Am.*, 69(4):532–536, 1979.
- [21] A. Gershun. The Light Field, Moscow, 1936. Translated by P. Moon and G. Timoshenko in. *Journal of Mathematics and Physics*, 18:51–151.
- [22] P. Moon and D. E. Spencer. *The photic field*. MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
- [23] John T. Winthrop. Propagation of structural information in optical wave fields. *J. Opt. Soc. Am.*, 61(1):15–30, Jan 1971.
- [24] Fred E. Nicodemus. Optical resource letter on radiometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 59(3):243–248, Mar 1969.
- [25] M. Gutierrez, J. C. Minano, C. Vega, and P. Benitez. Application of Lorentz geometry to nonimaging optics: new three-dimensional ideal concentrators. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13(3):532–540, 1996.
- [26] P. Benítez. Elliptic ray bundles in three-dimensional geometry for nonimaging optics: a new approach. *Journal of the Optical Society of America A*, 16(9):2245–2252, 1999.
- [27] A. C. Claus. On Archimedes Burning Glass. *Applied Optics*, 12(10):14, 1973.
- [28] A. Garcia-Botella, A. A. Fernandez-Balbuena, and E. Bernabeu. Elliptical concentrators. *Applied Optics*, 45(29):7622–7627, 2006.
- [29] H. A. Buchdahl. *An Introduction to Hamiltonian Optics*. Courier Dover Publications, 1993.

- [30] J. C. Miñano. Cylindrical concentrators as a limit case of toroidal concentrators. *Appl. Opt.*, 23(12), 1984.
- [31] TracePro Lambda Research. [www.lambdares.com](http://www.lambdares.com). 2009.
- [32] W. Spirk, H. Ries, J. Muschawek, and R. Winston. Nontracking solar concentrators. *Solar energy*, 62(2):113–120, 1998.
- [33] C. J. Sletten, F. S. Holt, and S. B. Herskovitz. Wide-angle lenses and image collapsing subreflectors for nontracking solar collectors. *Applied Optics*, 19:1439–1453, 1980.
- [34] C. Rooman, M. Kuijk, R. Vounckx, and P. Heremans. Reflective-refractive microlens for efficient light-emitting-diode-to-fiber coupling. *Optical Engineering*, 44:095005, 2005.
- [35] T. Alahautala and R. Hernberg. Generation of Uniform Light by Use of Diode Lasers and a Truncated Paraboloid with a Lambertian Scatterer. *Applied Optics*, 43(4):949–954, 2004.
- [36] A. García-Botella. *Dispositivos ópticos de señalización vial activa*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2000.
- [37] P. Benitez. *Conceptos avanzados de óptica anidológica: diseño y fabricación, Capítulo 6: El diseño SMS en tres dimensiones*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- [38] V. Fock. Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 28(1):102–113, 1924.
- [39] A. Garcia-Botella, A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez-Molini, and E. Bernabeu. Ideal 3D asymmetric concentrator. *Solar Energy*, 83(1):113–117, 2009.
- [40] J. O’Gallagher, R. Winston, and W. T. Welford. Axially symmetric nonimaging flux concentrators with the maximum theoretical concentration ratio. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(1):66–68, 1987.
- [41] A. García-Botella, A. A. Fernández-Balbuena, D. Vázquez, E. Bernabeu, and A. González-Cano. Hyperparabolic concentrators. *Applied Optics*, 48(4):712–715, 2009.
- [42] A. García-Botella and A. A. Fernández-Balbuena. Patente: Concentrador de radiación hiperbólico parabólico. *OEPM*, (Solicitud P200802876), 2008.
- [43] A. Garcia-Botella, A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, E. Bernabeu, and A. Gonzalez-Cano. Field method for concentrator design. In *Proceedings of SPIE*, volume 7423-5. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [44] R. L. Garwin. The design of liquid scintillation cells. *Review of Scientific Instruments*, 23(12):755, 1952.
- [45] D. Vazquez-Molini, M. Gonzalez-Montes, A. A. Fernandez-Balbuena, and E. Bernabeu. High-efficiency light-emitting diode collimator. *Optical Engineering*, 49(12):3001, 2010.
- [46] W. Shaomin and L. Ronchi. III Principles and Design of Optical Arrays. *Progress in Optics*, 25:279–348, 1988.
- [47] D. Vázquez, J. Alda, and E. Bernabeu. Planar optical array with a spatial-integration feature. *Applied optics*, 38(7):1133–1138, 1999.
- [48] D. Vázquez and E. Bernabeu. Array optical devices for natural lighting. *Lighting Research and Technology*, 29(1):33, 1997.
- [49] P. J. Littlefair. Review Paper: Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods. *Lighting Research and Technology*, 22(1):1, 1990.
- [50] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez-Molini, J. Alda, and E. Bernabeu. Improved spatial integrator with axicon-dioptic elements. *Optical Engineering*, 45:073002, 2006.
- [51] D. Vázquez-Moliní, A. A. Fernandez-Balbuena, E. Bernabeu, and J. Alda. Louvers design for LED displays for sunny days. *Displays*, 28(4-5):167–173, 2007.
- [52] A. Borenstein. Traffic signal using light-emitting diodes, September 4 1990. US Patent 4,954,822.
- [53] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, B. Garcia-Fernandez, and E. Bernabeu. Antiglare Traffic Signal by Natural Lighting. In *Colour and light in architecture*, pages 453–458. University IUAV of Venice, Italy, 2010.
- [54] J. J. Rojo Sastre, D. Vázquez-Moliní, and A. A. Fernandez-Balbuena. Panel matricial de señalización vial. *OEPM*, (Solicitud ES 2188425), 2001.
- [55] J. E. Kaufman and Illuminating Engineering Society. *IES lighting handbook: The standard lighting guide*. Illuminating Engineering Society, 2000.
- [56] G. Gillette, W. Pierpoint, and S. Treado. A general illuminance model for daylight availability. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 13(2):330–340, 1984.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [57] D. Vázquez-Moliní, A. García-Botella, A. A. Fernández-Balbuena, L. García, and W. Polh. Patente: Dispositivo pasivo de captación y/o redirección de radiación solar para su conducción. *OEPM*, (Solicitud P200801668), 2008.
- [58] D. Vazquez-Molini, A. A. Fernandez-Balbuena, A. Garcia-Botella, and E. Bernabeu. High efficiency 90° elbow for light guides. In *Proceedings of SPIE*, volume 7059-27, page 70590S. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2008.
- [59] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, B. Garcia-Fernandez, A. Garcia-Botella, and E. Bernabeu. Skylight: a hollow prismatic CPC. In *Proceedings of SPIE*, volume 7423-27, page 74230T. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.
- [60] L. A. Whitehead. Simplified ray tracing in cylindrical systems. *Appl. Opt.*, 21(19):3536–3538, 1982.
- [61] Norma UNE 12464-1. *Luz y Alumbrado o Iluminación - Alumbrado de los puestos de trabajo*. CEN, 1997.
- [62] Recomendación CIE 117. *Discomfort glare in interior lighting*. Commission Internationale de L’Eclairage, 1995.
- [63] Recomendación CIE 147. *Glare from small, large and complex sources*. Commission Internationale de L’Eclairage, 2002.
- [64] L. Edwards and P. Torcellini. A literature review of the effects of natural light on building occupants. *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*, 2002.
- [65] D. Vázquez-Moliní, M. González Montes, A. A. Fernandez-Balbuena, E. Bernabeu, A. Garcia-Botella, L. García, and W. Pohl. Active Daylighting System (ADASY). In *Proceedings of SPIE*, volume 7410-2, page 74100H. SPIE Optics and Photonics, San Diego, 2009.
- [66] D. Vázquez-Moliní, A. A. Fernandez-Balbuena, M. González Montes, A. Garcia-Botella, L. García, E. Bernabeu, and W. Pohl. Guiding daylight into a building for energy-saving illumination. In *SPIE Newsroom*. DOI: 10.1117/2.1200911.1825, San Diego, 2009.
- [67] M. Kischkoweit-Lopin. An overview of daylighting systems. *Solar Energy*, 73(2):77–82, 2002.
- [68] N. Ruck, O. Aschehoug, A. Aydinli, J. Christoffersen, G. Courret, I. Edmonds, R. Jakobiak, M. Kischkoweit-Lopin, M. Klinger, E. Lee, et al. *Daylight in Buildings: A Source Book on daylighting Systems and Components*, volume 21. 2000.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [69] Recomendación CIE 97. *Maintenance of indoor electric lighting systems*. Commission Internationale de L'Eclairage, 1997.
- [70] W. K. E. Osterhaus. Discomfort glare from large area glare sources at computer workstations. In *Proc. of the 1996 International Daylight Workshop: Building with Daylight: Energy Efficient Design*, pages 103–110, 1996.
- [71] H. D. Einhorn. Discomfort glare: a formula to bridge differences. *Lighting Research & Technology*, 11(2):90, 1979.
- [72] H. D. Einhorn. A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research & Technology*, 1(4):235, 1969.
- [73] R.G. Hopkinson. Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, pages 206–215, 1972.
- [74] A. A. Nazzal. A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4):295–306, 2005.
- [75] W. K. E. Osterhaus. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2):140–158, 2005.
- [76] J. Wienold and J. Christoffersen. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy & Buildings*, 38(7):743–757, 2006.
- [77] A. Wilks and W. K. E. Osterhaus. Towards an assessment method for visual comfort in daylit offices. *IEA SHC Task*, 31, 2003.
- [78] S. Shlaer. The relation between visual acuity and illumination. *Journal of General Physiology*, 21(2):165, 1937.
- [79] D. Vazquez-Moliní, A. A. Fernandez-Balbuena, J. Zoido, E. Bernabeu, and A. Garcia-Botella. Desplazamiento cromático en guías de luz para iluminación natural. *VIII Congreso Nacional de Color Madrid*, 2007.
- [80] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vazquez-Moliní, B. García-Fernandez, L. García-Rodríguez, and T. Galán-Cañestro. Daylight illumination system by vertical transparent prismatic lightguide for an office building. University IUAV of Venice, Italy, 2010.
- [81] G. M. Amdahl. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. In *Proceedings of the April 18-20, 1967, spring joint computer conference*, pages 483–485. ACM, 1967.
- [82] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4):308, 1965.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [83] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1):112–147, 1999.